

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-249720

(43)Date of publication of application : 14.09.2001

(51)Int.Cl.

G05D 3/12

G05B 11/32

H02P 5/00

(21)Application number : 2000-062836

(71)Applicant : MITSUBISHI ELECTRIC CORP

(22)Date of filing : 08.03.2000

(72)Inventor : IKEDA HIDETOSHI

NAGANO TETSUAKI

TERADA HIROSHI

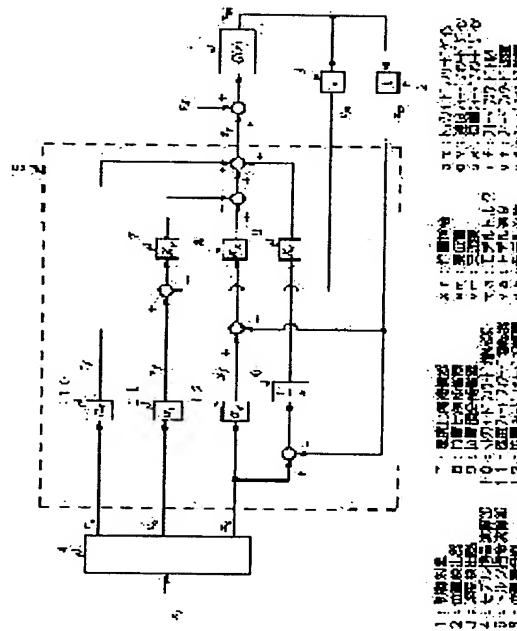
YOSHIDA MASAHIKO

## (54) POSITION CONTROLLER

### (57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To precisely adjust the fine model error of an object to be controlled while optimally holding a response to disturbance, and to realize quickly decidable control without exciting machine resonance by simple adjustment in a position controller for allowing a position command to follow up the actual position of the object to be controlled by using a model signal arithmetic unit.

**SOLUTION:** This device is provided with a torque feedforward amplifier 10, a speed feedforward amplifier 11, and a position feedforward amplifier 12, and each torque feedforward gain  $\alpha_t$ , speed feedforward gain  $\alpha_v$ , and position feedforward gain  $\alpha_x$  can be independently set so as to be made independent of a speed proportional gain  $K_v$ , a position proportional gain  $K_x$ , and a position integral gain  $K_i$ . Thus, it is possible to reduce overshoot while optimally maintaining characteristics against disturbance, and to realize quickly decidable control by simple fine adjustment.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

**書誌**

(19)【発行国】日本国特許庁(JP)

(12)【公報種別】公開特許公報(A)

(11)【公開番号】特開2001-249720(P2001-249720A)

(43)【公開日】平成13年9月14日(2001. 9. 14)

(54)【発明の名称】位置制御装置

(51)【国際特許分類第7版】

G05D 3/12

G05B 11/32

H02P 5/00

**【FI】**

G05D 3/12 S

G05B 11/32 F

H02P 5/00 X

【審査請求】未請求

【請求項の数】13

【出願形態】OL

【全頁数】27

(21)【出願番号】特願2000-62836(P2000-62836)

(22)【出願日】平成12年3月8日(2000. 3. 8)

(71)【出願人】

【識別番号】000006013

【氏名又は名称】三菱電機株式会社

【住所又は居所】東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(72)【発明者】

【氏名】池田 英俊

【住所又は居所】東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(72)【発明者】

【氏名】長野 鉄明

【住所又は居所】東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(72)【発明者】

【氏名】寺田 啓

【住所又は居所】東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(72)【発明者】

【氏名】吉田 雅彦

【住所又は居所】東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社内

(74)【代理人】

【識別番号】100093562

【弁理士】

【氏名又は名称】児玉 俊英

【テーマコード(参考)】

5H004

5H303

5H550

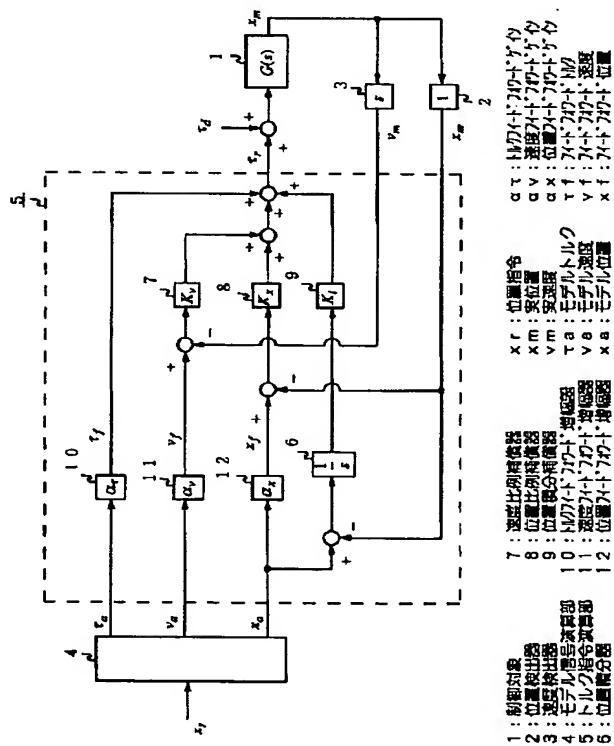
## 【Fターム(参考)】

5H004 GA03 GA05 GB15 HA07 HB07 JA11 JB09 KB32 KB37 KC27 LA02 LA13  
 5H303 AA01 CC05 DD01 FF03 HH01 JJ01 KK02 KK03 KK11 KK28  
 5H550 AA18 BB10 DD01 EE05 GG01 GG10 HB08 JJ04 JJ11 JJ23 JJ24 JJ25 JJ26 LL01 LL32 LL34  
**要約**

## (57)【要約】

【課題】モデル信号演算部を使用し、制御対象の実位置を位置指令に追従させる位置制御装置において、外乱に対する応答を最適に保ったまま、制御対象の微少なモデル誤差に対する調整を緻密に行い、また簡単な調整で、機械共振を励起せずに高速に整定する制御を実現するためのものである。

【解決手段】トルクフィードフォワード増幅器10、速度フィードフォワード増幅器11および位置フィードフォワード増幅器12を備え、それぞれのトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_T$ 、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_V$ および位置フィードフォワードゲイン $\alpha_X$ を互いに独立に、かつ速度比例ゲイン $K_V$ 、位置比例ゲイン $K_X$ 、位置積分ゲイン $K_I$ と独立に設定可能な構成とすることにより、簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。



## 請求の範囲

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指

令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインを上記速度フィードフォワードゲインと独立に、かつ上記フィードバックゲインと独立に1以外の値に設定可能な構成としたことを特徴とする位置制御装置。

【請求項2】位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとのすべてを上記フィードバックゲインと独立に設定可能な構成としたことを特徴とする位置制御装置。

【請求項3】フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを互いに独立に設定可能な構成としたことを特徴とする請求項2記載の位置制御装置。

【請求項4】フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、フィードバックゲインと独立な関係式を用いて設定する構成としたことを特徴とする請求項2記載の位置制御装置。

【請求項5】フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたことを特徴とする請求項4記載の位置制御装置。

(位置フィードフォワードゲイン) = (速度フィードフォワードゲイン) = (トルクフィードフォワードゲイン)

【請求項6】フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたことを特徴とする請求項4記載の位置制御装置。

(トルクフィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)<sup>3</sup> (速度フィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)<sup>2</sup>【請求項7】外部からの位置指令 $x_r$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $x_m$ 、速度検出信号である実速度 $v_m$ とを入力しトルク指令 $\tau_r$ を出力し、上記実位置 $x_m$ が上記位置指令 $x_r$ に一致するように上記トルク指令 $\tau_r$ に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $x_r$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $x_a$ とこのモデル位置 $x_a$ の微分信号であるモデル速度 $v_a$ とこのモデル速度 $v_a$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデル位置 $x_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力し、位置比例ゲイン $K_x$ と速度比例ゲイン $K_v$ と位置積分ゲイン $K_i$ とトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_{tr}$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ とを用いた次式で表される演算に基づいて上記トルク指令 $\tau_r$ を出力するトルク指令演算部を備えたことを特徴とする請求項1ないし6のいずれかに記載の位置制御装置。

$$\tau_r = \alpha_{tr} \cdot \tau_a + K_v \cdot (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \cdot (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m)$$

s: ラプラス演算子【請求項8】トルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha$ を乗算したフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、モデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $x_f$ を出力する位置フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差を積分した信号を出力する

位置積分器、上記フィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に速度比例ゲイン $Kv$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記フィードフォワード位置 $xf$ と実位置 $xm$ との偏差に位置比例ゲイン $Kx$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $Ki$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、上記フィードフォワードトルク $tf$ および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 $tr$ として出力することを特徴とする請求項7記載の位置制御装置。

【請求項9】トルク指令演算部は、モデルトルク $ta$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗算したフィードフォワードトルク $tf$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $va$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $vf$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $va$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\beta_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $xf$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差から上記フィードフォワード位置 $xf$ を減算した信号を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に速度比例ゲイン $Kv$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置比例ゲイン $Kx$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $Ki$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ は次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク $tf$ および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 $tr$ として出力することを特徴とする請求項7記載の位置制御装置。

$\alpha_x = 1 - Ki \cdot \beta_x / Kx$ 【請求項10】トルク指令演算部は、モデルトルク $ta$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗算したフィードフォワードトルク $tf$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $va$ に速度フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $vf$ を出力する速度フィードフォワード低減器、モデル位置 $xa$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $xf$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置ゲイン $\omega_x$ を乗算した信号を出力する位置補償器、および上記モデル速度 $va$ と実速度 $vm$ との偏差に上記位置補償器の出力を加算した信号を入力し、速度比例ゲイン $Kv$ と積分ゲイン $\omega PI$ の $PI$ (比例積分)演算を行って誤差補償トルク $tc$ を出力する速度 $PI$ 補償器を備え、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ および位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ はそれぞれ次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク $tf$ からフィードフォワード速度 $vf$ とフィードフォワード位置 $xf$ とを減算した信号に誤差補償トルク $tc$ を加算した信号をトルク指令 $tr$ として出力することを特徴とする請求項7記載の位置制御装置。

$$\alpha_v = 1 - \gamma_v / Kv \quad \alpha_x = 1 - \gamma_x / [Kv(\omega_x + \omega PI)]$$

【請求項11】外部からの位置指令 $xr$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $xm$ 、速度検出信号である実速度 $vm$ とを入力しトルク指令 $tr$ を出力し、上記実位置 $xm$ が上記位置指令 $xr$ に一致するように上記トルク指令 $tr$ に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $xr$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $xa$ とこのモデル位置 $xa$ の微分信号であるモデル速度 $va$ とこのモデル速度 $va$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク $ta$ とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク $ta$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗算したフィードフォワードトルク $tf$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $va$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $vf$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置積分ゲイン $\omega_i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器、位置積分補償器の出力から上記モデル速度 $va$ とフィードフォワード速度 $vf$ との偏差を減算した信号を積分した信号を出力する積分器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に上記積分器の出力を加算した信号に位置ゲイン $\omega_x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記フィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に上記位置比例補償器の出力を加算した信号に速度比例ゲイン $Kv$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器を設け、上記フィードフォワードトルク $tf$ と速度比例補償器の出力信号との加算値をトルク指令 $tr$ として出力するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を下式で設定することを特徴とする請求項2記載の位置制御装置。

$\alpha_x = \alpha_v$ 【請求項12】モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成したことを特徴とする請求項1ないし11のいず

れかに記載の位置制御装置。

【請求項13】位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成し、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、かつ、少なくとも上記位置フィードフォワードゲインは1以外の値に設定可能な構成としたことを特徴とする位置制御装置。

## 詳細な説明

### 【発明の詳細な説明】

#### 【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、工作機械などにおいて電動機等のトルク発生器を用いて機械系の位置制御を行う制御装置に関する。

#### 【0002】

【従来の技術】モータなどのトルク発生器を用いて工作機械などの位置制御を行う位置制御装置では、高速高精度な位置決め制御を実現するために、機械共振を励起しないような制御が望まれ、また、整定時にオーバーシュートを起こすとクーロン摩擦の影響で整定時間が長くなるためオーバーシュートを起こさないような制御が望まれる。また、このような位置制御装置では、フィードフォワードを用いて位置指令に対する追従性を高速化させることが行われる。

【0003】図12は、例えば「計測と制御」vol.12,p.1010～p.1011に記載の第1の従来技術の位置制御装置の構成を示すブロック図である。図12において、1はトルク指令 $\tau_r$ に応じたトルクを発生することにより機械系を駆動する制御対象である。2は制御対象1の位置である実位置 $x_m$ を検出する位置検出器である。3は実位置 $x_m$ の微分信号である実速度 $v_m$ を検出する速度検出器である。4は位置指令 $x_r$ を入力しモデル位置 $x_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部である。505はトルク指令演算部である。506は位置補償器である。507は速度PI補償器である。次に図12に示した第1の従来技術の動作について説明する。まず、制御対象1の特性について説明する。制御対象1における発生トルクがトルク指令 $\tau_r$ に理想的に一致するとした場合、制御対象1の伝達特性を $G(s)$ と記述すると、トルク指令 $\tau_r$ および外乱トルク $\tau_d$ と実位置 $x_m$ との関係は次の式1で表される。ただし、次式および以降において $s$ はラプラス演算子を表す。

$$x_m = G(s) \cdot \tau_r + G(s) \cdot \tau_d \quad \dots \quad (式1)$$

【0004】また、制御対象1が完全な剛体機械であると考えると、制御対象1の伝達特性 $G(s)$ は次の式2で表される。

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2) \quad \dots \quad (式2)$$

【0005】しかしながら実際の制御対象には機械共振や摩擦などのモデル誤差が存在し、例えば摩擦係数 $f$ の粘性摩擦が存在する場合の制御対象の伝達特性 $G(s)$ は次の式3となる。

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2 + f \cdot s) \quad \dots \quad (式3)$$

【0006】次にモデル信号演算部4の動作について説明する。モデル信号演算部4は外部から位置制御装置に与える位置指令 $x_r$ を入力し、ローパス特性であるモデル伝達特性 $G_a(s)$ の伝達関数演算に基づくモデル位置 $x_a$ と、モデル位置 $x_a$ の微分信号であるモデル速度 $v_a$ と、モデル速度 $v_a$ の微分信号であるモデル加速度 $a_a$ と、予め推定した制御対象のイナーシャ値であるモデルイナーシャ $J_a$ をモデル加速度 $a_a$ に乗じた信号であるモデルトルク $\tau_a$ を演算し、上記のモデル位置 $x_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデルトルク $\tau_a$ とを出力する。

【0007】ここで、外乱トルク $\tau_d$ が無く、制御対象1の特性が理想的な剛体機械でそのイナーシャ $J$ がモ

トルク $\tau_a$ を用いて制御対象1を駆動すれば、制御対象1の実位置 $x_m$ とモデル位置 $x_a$ および実速度 $v_m$ とモデル速度 $v_a$ とが完全に一致し、位置指令 $x_r$ から実位置 $x_m$ までの伝達特性はモデル伝達特性 $G_a(s)$ に一致する。すなわち次の式4が成り立つ。

$$x_m/x_r = x_a/x_r = G_a(s) \quad \dots \dots \text{(式4)}$$

【0008】次にトルク指令演算部505の動作について説明する。実際の制御対象1には外乱やモデル誤差が存在するため、実位置 $x_m$ とモデル位置 $x_a$ および実速度 $v_m$ とモデル速度 $v_a$ との間には誤差が生じる。位置補償器506はモデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との差を位置ゲイン $\omega_x$ 倍した信号を出力し、速度PI補償器507はモデル速度 $v_a$ と実速度 $v_m$ との差信号に位置補償器506の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン $K_v$ と積分ゲイン $\omega_{PI}$ のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク $\tau_c$ を出力する。また、トルク指令演算部505はモデルトルク $\tau_a$ と誤差補償トルク $\tau_c$ の和信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力する。すなわちトルク指令演算部505は以下の式5の演算によりトルク指令 $\tau_r$ を演算する。

$$\tau_r = \tau_a + K_v \cdot (1 + \omega_{PI}/s) \{ v_a - v_m + \omega_x (x_a - x_m) \}$$

$$\dots \dots \text{(式5)}$$

【0009】トルク指令演算部505は上記のモデルトルク $\tau_a$ と誤差補償トルク $\tau_c$ との和信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力することにより、制御対象1が理想モデルの場合には、モデルトルク $\tau_a$ だけで、また制御対象1にモデル誤差が有った場合には誤差補償トルク $\tau_c$ を加えて制御対象1を駆動することにより、実位置 $x_m$ がモデル位置 $x_a$ に追従するように制御する。

【0010】また、モデル伝達特性 $G_a(s)$ はローパス特性としているため、制御対象1に機械共振など高い周波数のモデル誤差が存在した場合には、モデル伝達特性 $G_a(s)$ の応答を遅く、すなわちローパス特性の遮断周波数を低くすることにより機械共振が抑制され、結果的に高速な整定を実現することができる。

【0011】このように、第1の従来技術は、モデル伝達特性 $G_a(s)$ をローパス特性とすることで比較的高周波域(数10Hz程度)の機械共振を抑制している。しかし、同じくこのモデル伝達特性 $G_a(s)$ のローパス特性に期待してオーバーシュートをも抑制しようとすると、このオーバーシュートは更に低い周波数域(数Hz程度以下)での現象であるので、モデル伝達特性 $G_a(s)$ をこれに合わせた特性のものとすると、制御応答が非常に遅くなり、高速に整定する制御の実現が困難であった。

【0012】次に、図13は、例えば特開平05-216540号公報に記載の第2の従来技術の制御系構成図である。図13では離散時間系の制御系を連続時間系に変換して、等価的に記載している。図13において図12と同一符号は同一部分を示す。605はトルク指令演算部である。606は位置補償器、607は速度PI補償器である。612はトルクフィードフォワード増幅器、611は速度フィードフォワード増幅器である。608は第1の微分器、609は第2の微分器、610はイナーシャ増幅器である。

【0013】次に第2の従来技術の動作について説明する。第1の従来技術と同一部分は、その動作の説明を省略する。第1の微分器608は位置指令 $x_r$ を微分して速度指令 $v_r$ を出力し、第2の微分器609は速度指令 $v_r$ を微分して加速度指令 $a_r$ を出力し、イナーシャ増幅器610は加速度指令 $a_r$ に予め設定した制御対象1のイナーシャの推定値 $J_a$ を乗じたモデルトルク $\tau_a$ を出力する。

【0014】次にトルク指令演算部605の動作について説明する。トルク指令演算部605は位置指令 $x_r$ と速度指令 $v_r$ とモデルトルク $\tau_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力する。トルク指令演算部605の内部においてトルクフィードフォワード増幅器612はモデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗じたフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力し、速度フィードフォワード増幅器611は速度指令 $v_r$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗じたフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する。

【0015】次に位置補償器606は位置指令 $x_r$ と実位置 $x_m$ との差信号に位置ゲイン $\omega_x$ を乗じた信号を出力し、速度PI補償器607はフィードフォワード速度 $v_f$ と実速度 $v_m$ との差信号に位置補償器606の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン $K_v$ と積分ゲイン $\omega_{PI}$ のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク $\tau_c$ を出力する。また、トルク指令演算部605はモデルトルク $\tau_a$ と誤差補償トルク $\tau_c$ との和信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力する。すなわちトルク指令演算部605は以下の式6の演算によりトルク指令 $\tau_r$ を演算する。

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (1 + \omega_{PI}/s) \{ \alpha_v \cdot v_r - v_m + \omega_x (x_r - x_m) \} \dots \dots \text{(式6)}$$

【0016】第2の従来技術は上記のように構成することにより、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を1とすると、制御対象1が理想モデルの場合には位置指令 $x_r$ と実位置 $x_m$

$m$ とが一致するような制御が可能になる。また、制御対象1のモデル誤差や外乱トルク $\tau_d$ に対しては誤差補償トルク $\tau_c$ によって補償される。ここで、また更に、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha_T$ および速度フィードフォワードゲイン $\alpha_V$ を1から変更して微調整を行い、制御対象1のモデル誤差による位置指令 $x_r$ に対する実位置 $x_m$ の微少な応答誤差を修正する。

【0017】しかしながら第2の従来技術では、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha_T$ を0にしなければ位置指令 $x_r$ を2階微分した信号成分が直接トルク指令 $\tau_r$ に印加されるため、トルク指令 $\tau_r$ に高周波数成分が含まれ、制御対象1の特性に高周波数の機械共振が含まれている場合には、機械共振を励起して高速な整定を実現するのが困難だという問題が有った。

【0018】また、伝達特性で考えると速度の積分は位置であるため、第2の従来技術では、次の式7、式8の関係を用い、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるように式6を変換すると、トルク指令演算部605は以下の式9の演算を行うことになる。

$$x_r = (1/s)v_r \quad \dots \quad (式7)$$

$$x_m = (1/s)v_m \quad \dots \quad (式8)$$

$$\begin{aligned} \tau_r = & \alpha_T \cdot \tau_a + K_v (\alpha_V \cdot v_r - v_m) + K_v (\omega_{PI} + \omega_x) (\alpha_x \cdot x_r - x_m) \\ & + K_v \cdot \omega_x \cdot \omega_{PI} (1/s) (x_r - x_m) \quad \dots \quad (式9) \end{aligned}$$

ただし、上記の $\alpha_x$ は次の式10で表される。

$$\alpha_x = (\alpha_V \cdot \omega_{PI} + \omega_x) / (\omega_{PI} + \omega_x) \quad \dots \quad (式10)$$

【0019】式10の $\alpha_x$ を位置フィードフォワードゲインと呼ぶとすると、図13に示す構造の第2の従来技術では、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を位置ゲイン $\omega_x$ 、積分ゲイン $\omega_{PI}$ 、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_V$ と独立に調整することができない。ここで、位置ゲイン $\omega_x$ および積分ゲイン $\omega_{PI}$ は外乱トルク $\tau_d$ に対する応答を決定する制御ゲインすなわちフィードバックゲインである。したがって、外乱トルク $\tau_d$ に対する特性すなわちフィードバック特性を最適に保ったまま、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha_T$ 、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_V$ 、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を最適に設定することが困難であるため、制御対象1のモデル誤差に対応した最適な調整が困難であるという問題が有る。また、オーバーシュートを抑制するための調整を簡単に行うのが困難であるという問題が有る。

【0020】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、第1の従来技術では、整定時のオーバーシュートを抑制しようとすると、位置指令 $x_r$ に対するモデル位置 $x_m$ の応答をかなり遅くする必要があるため、実位置 $x_m$ の応答が遅くなり、高速な整定を得るのが困難であるという問題が有った。

【0021】また、第2の従来技術では、高速な応答を得ようするとトルク指令 $\tau_r$ に高周波数成分が印加されるため、制御対象1に機械共振が有る場合には共振を励起し、高速な整定を得るのが困難であるという問題があった。また、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ をフィードバックゲインおよび速度フィードフォワードゲイン $\alpha_V$ と独立に設定できないため、外乱に対する応答を最適に保ったまま、制御対象の微少なモデル誤差に対して高速な整定を得るような、最適な制御を実現するのが困難であるという問題が有った。また、簡単な演算や簡単な調整でオーバーシュートを抑制して高速に整定する制御が困難であるという問題が有った。

【0022】本発明は上記のような問題を解決するためになされたものであり、外乱に対する応答を最適に保ったまま、制御対象の微少なモデル誤差に対する調整を緻密に行い、また簡単な調整で、機械共振を励起せずに高速に整定する制御を実現するためのものである。

【0023】

【課題を解決するための手段】この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインを上記

速度フィードフォワードゲインと独立に、かつ上記フィードバックゲインと独立に1以外の値に設定可能な構成としたものである。

【0024】この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとのすべてを上記フィードバックゲインと独立に設定可能な構成としたものである。

【0025】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを互いに独立に設定可能な構成としたものである。

【0026】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、フィードバックゲインと独立な関係式を用いて設定する構成としたものである。

【0027】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたものである。

$$(位置フィードフォワードゲイン) = (速度フィードフォワードゲイン) = (トルクフィードフォワードゲイン)$$

【0028】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたものである。

(トルクフィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)<sup>3</sup> (速度フィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)<sup>2</sup>【0029】この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 $x_r$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $x_m$ 、速度検出信号である実速度 $v_m$ とを入力しトルク指令 $\tau_r$ を出力し、上記実位置 $x_m$ が上記位置指令 $x_r$ に一致するように上記トルク指令 $\tau_r$ に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $x_r$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $x_a$ とこのモデル位置 $x_a$ の微分信号であるモデル速度 $v_a$ とこのモデル速度 $v_a$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデル位置 $x_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力し、位置比例ゲイン $K_x$ と速度比例ゲイン $K_v$ と位置積分ゲイン $K_i$ とトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ とを用いた次式で表される演算に基づいて上記トルク指令 $\tau_r$ を出力するトルク指令演算部を備えたものである。

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \cdot (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m)$$

$s$ ：ラプラス演算子【0030】この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗算したフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、モデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $x_f$ を出力する位置フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $v_f$ と実速度 $v_m$ との偏差に速度比例ゲイン $K_v$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記フィードフォワード位置 $x_f$ と実位置 $x_m$ との偏差に位置比例ゲイン $K_x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $K_i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、上記フィードフォワード

ードトルク $\tau_f$ および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 $\tau_r$ として出力するものである。

【0031】この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗算したフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $v_a$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\beta_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $x_f$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差から上記フィードフォワード位置 $x_f$ を減算した信号を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $v_f$ と実速度 $v_m$ との偏差に速度比例ゲイン $K_v$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差に位置比例ゲイン $K_x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $K_i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ は次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク $\tau_f$ および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 $\tau_r$ として出力するものである。

$\alpha_x = 1 - K_i \cdot \beta_x / K_x$ 【0032】この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗算したフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する速度フィードフォワード低減器、モデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $x_f$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差に位置ゲイン $\omega_x$ を乗算した信号を出力する位置補償器、および上記モデル速度 $v_a$ と実速度 $v_m$ との偏差に上記位置補償器の出力を加算した信号を入力し、速度比例ゲイン $K_v$ と積分ゲイン $\omega_{PI}$ のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク $\tau_c$ を出力する速度PI補償器を備え、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ および位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ はそれぞれ次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク $\tau_f$ からフィードフォワード速度 $v_f$ とフィードフォワード位置 $x_f$ とを減算した信号に誤差補償トルク $\tau_c$ を加算した信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力するものである。

$$\alpha_v = 1 - \gamma_v / K_v \quad \alpha_x = 1 - \gamma_x / [K_v(\omega_x + \omega_{PI})]$$

【0033】この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 $x_r$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $x_m$ 、速度検出信号である実速度 $v_m$ とを入力しトルク指令 $\tau_r$ を出力し、上記実位置 $x_m$ が上記位置指令 $x_r$ に一致するように上記トルク指令 $\tau_r$ に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $x_r$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $x_a$ とこのモデル位置 $x_a$ の微分信号であるモデル速度 $v_a$ とこのモデル速度 $v_a$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗算したフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差に位置積分ゲイン $\omega_i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器、位置積分補償器の出力から上記モデル速度 $v_a$ とフィードフォワード速度 $v_f$ との偏差を減算した信号を積分した信号を出力する積分器、上記モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差に上記積分器の出力を加算した信号に位置ゲイン $\omega_x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記フィードフォワード速度 $v_f$ と実速度 $v_m$ との偏差に上記位置比例補償器の出力を加算した信号に速度比例ゲイン $K_v$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器を設け、上記フィードフォワードトルク $\tau_f$ と速度比例補償器の出力信号との加算値をトルク指令 $\tau_r$ として出力するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を下式で設定するものである。

$\alpha_x = \alpha_v$ 【0034】この発明に係る位置制御装置のモデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成したものである。

【0035】この発明に係る位置制御装置の位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入

力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成し、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、かつ、少なくとも上記位置フィードフォワードゲインは1以外の値に設定可能な構成としたものである。

【0036】

【発明の実施の形態】実施の形態1. 図1はこの発明における実施の形態1の位置制御装置の構成を示すブロック図である。図1において、1はトルク指令 $\tau_r$ に応じたトルクを発生することにより機械系を駆動する制御対象である。2は制御対象1の位置である実位置 $x_m$ を検出する位置検出器である。3は実位置 $x_m$ の微分信号である実速度 $v_m$ を検出する速度検出器である。4は外部から位置指令 $x_r$ を入力しモデル位置 $x_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部である。5はトルク指令演算部である。6は位置積分器である。7は速度比例補償器、8は位置比例補償器、9は位置積分補償器である。10はトルクフィードフォワード增幅器、11は速度フィードフォワード增幅器、12は位置フィードフォワード增幅器である。

【0037】次に実施の形態1の動作について説明する。まず、制御対象1の特性について説明する。制御対象1における発生トルクがトルク指令 $\tau_r$ に理想的に一致するとした場合、制御対象1の伝達特性を $G(s)$ と記述すると、トルク指令 $\tau_r$ および外乱トルク $\tau_d$ と実位置 $x_m$ との関係は次の式1で表される。ただし、次式および以降において $s$ はラプラス演算子を表す。

$$x_m = G(s) \cdot \tau_r + G(s) \cdot \tau_d \quad \dots \quad (\text{式1})$$

【0038】また、制御対象1が完全な剛体機械であるとした場合、制御対象1の伝達特性 $G(s)$ は次の式2で表される。ただし、下式において $J$ は制御対象1のイナーシャである、 $G(s) = 1 / (J \cdot s^2)$   $\dots$  (式2)

【0039】しかしながら実際の制御対象1には機械共振や摩擦などのモデル誤差が存在し、例えば摩擦係数 $f$ の粘性摩擦が存在する場合の制御対象の伝達特性 $G(s)$ は次の式3となる。

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2 + f \cdot s) \quad \dots \quad (\text{式3})$$

【0040】次にモデル信号演算部4の動作を説明する。モデル信号演算部4は外部から位置制御装置に与える位置指令 $x_r$ を入力し、ローパス特性であるモデル伝達特性 $G_a(s)$ の伝達関数演算に基づいてモデル位置 $x_a$ を演算し、更にモデル位置 $x_a$ の微分信号であるモデル速度 $v_a$ と、モデル速度 $v_a$ の微分信号であるモデル加速度 $a_a$ を演算し、更にモデル信号演算部4は予め設定した制御対象のイナーシャ値であるモデルイナーシャ $J_a$ をモデル加速度 $a_a$ に乗じた信号であるモデルトルク $\tau_a$ を演算し、上記のモデル位置 $x_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデルトルク $\tau_a$ とを出力する。モデル伝達特性 $G_a(s)$ は例えば次の式11のような2次のローパス特性を選ぶ。

$$G_a(s) = 1 / (s + \omega_a)^2 \quad \dots \quad (\text{式11})$$

ここで、上記の式11における $\omega_a$ はモデルの応答周波数、すなわちローパス特性の遮断周波数で、位置指令 $x_r$ に対するモデルの応答の速さを決定するものである。

【0041】以上の動作によりモデル信号演算部4では以下の式12、式13、式14の伝達関数演算を行っている。

$$x_a = G_a(s) \cdot x_r \quad \dots \quad (\text{式12})$$

$$v_a = s \cdot G_a(s) \cdot x_r \quad \dots \quad (\text{式13})$$

$$\tau_a = J_a \cdot s^2 \cdot G_a(s) \cdot x_r \quad \dots \quad (\text{式14})$$

【0042】次にトルク指令演算部5の動作について説明する。トルク指令演算部5はモデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデル位置 $x_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力する。トルク指令演算部5の内部においてトルクフィードフォワード增幅器10はモデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗じたフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力し、速度フィードフォワード增幅器11はモデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗じたフィードフォワード速度 $v_f$ を出力し、位置フィードフォワード增幅器12はモデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を乗じたフィードフォワード位置 $x_f$ を出力する。

【0043】次に位置積分器6はモデル位置xaと実位置xmとの偏差を積分した信号を出力し、速度比例補償器7はフィードフォワード速度vfと実速度vmとの偏差に速度比例ゲインKvを乗じた信号を出力し、位置比例補償器8はフィードフォワード位置xfと実位置xmとの偏差に位置比例ゲインKxを乗じた信号を出力し、位置積分補償器9は位置積分器6の出力信号に位置積分ゲインKiを乗じた信号を出力し、トルク指令演算部5はフィードフォワードトルクtfと速度比例補償器7の出力と位置比例補償器8の出力と位置積分補償器9の出力との和信号をトルク指令trとして出力することにより制御対象1を制御する。

【0044】以上のように構成することによりトルク指令演算部5は、モデル位置xa、モデル速度va、モデルトルクta、実位置xm、実速度vmを入力し次の式15の伝達関数演算によりトルク指令trを出力する。

$$tr = \alpha\tau \cdot ta + Kv(\alpha v \cdot va - vm) + Kx(\alpha x \cdot xa - xm) + Ki(1/s)(xa - xm) \cdots \text{(式15)}$$

【0045】また、トルク指令演算部5は、トルクフィードフォワード増幅器10によりトルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ を、速度フィードフォワード増幅器11により速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ を、位置フィードフォワード増幅器12により位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ を、速度比例補償器7により速度比例ゲインKvを、位置比例補償器8により位置比例ゲインKxを、位置積分補償器9により位置積分ゲインKiを設定するため、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ と位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ とは互いに独立に、なおかつ速度比例ゲインKvおよび位置比例ゲインKxおよび位置積分ゲインKiと独立に設定することが可能である。なお、以降では速度比例ゲインKvと位置比例ゲインKxと位置積分ゲインKiとを総称してフィードバックゲインと呼び、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ 、速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ 、位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ を総称してフィードフォワードゲインと呼ぶ。

【0046】また、以降では制御対象1が式1で表される理想的剛体機械で、モデル信号演算部4のモデルイナーシャJaと制御対象1のイナーシャJが一致する場合を、制御対象1が理想モデルの場合と呼ぶこととする。

【0047】図1においてフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ 、 $\alpha v$ 、 $\alpha x$ を全て1にした場合は、第1の従来技術から図1への等価変換が可能である。すなわち図1の制御系は第1の従来技術と同様に動作し、制御対象1が理想モデルの場合は、位置指令xrに対して実位置xmとモデル位置xaとが完全に一致する。しかしながら、制御対象1が例えば式3のようにモデル誤差を持った場合、そのモデル誤差が微少でも、実位置xmが微少のオーバーシュートを起こすなどの問題を生じる。

【0048】次にトルク指令演算部5におけるフィードバックゲインKv、Kx、Kiの設定について図2を用いて説明する。図2は外乱 $\tau_d$ に対する実位置xmのステップ応答を示す図である。

【0049】フィードバックゲインKv、Kx、Kiは、外乱 $\tau_d$ に対して実位置xmと位置指令xrとの誤差の変動がなるべく小さくなるように設定する。図1における外乱 $\tau_d$ から実位置xmまでの伝達特性を $G_\tau(s)$ と記述すると、 $G_\tau(s)$ のステップ応答の概形は図2に示すような安定な波形になる。すなわち通常は $G_\tau(s)$ のステップ応答が、正の方向だけに変動して負の方向へ行きすぎないようにフィードバックゲインKv、Kx、Kiを設定する。なお、この $G_\tau(s)$ は、制御対象1を含む閉回路の応答であって、制御対象1の伝達特性 $G(s)$ と後述するフィードバック制御系の伝達特性 $C_b(s)$ とから以下の式により表される。

$$G_\tau(s) = G(s) / \{1 + G(s) \cdot C_b(s)\}$$

また、制御対象1が式2の理想的な剛体機械とした場合の $G_\tau(s)$ を $G_{\tau1}(s)$ と記述すると、 $G_{\tau1}(s)$ は次の式16となる。

$$G_{\tau1}(s) = s / (J \cdot s^3 + Kv \cdot s^2 + Kx \cdot s + Ki) \cdots \text{(式16)}$$

【0050】次にフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ 、 $\alpha v$ 、 $\alpha x$ の設定について、図3に示す一般的な2自由度制御系ブロックを用いて説明する。なお、図3の一般的な2自由度制御系は制御系の応答特性を解析するために用いるものである。図3において、図1と同一符号は同一部分を示す。13はフィードバック制御器である。14はフィードフォワード制御器である。

【0051】次に図3に示す一般的な2自由度制御系の動作について説明する。フィードフォワード制御器14は位置指令xrを入力し $C_f(s)$ の伝達関数演算によりフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力する。フィードバック制御器13は実位置xmを入力し $C_b(s)$ の伝達関数演算によりフィードバックトルク $\tau_b$ を出

力する。図3の2自由度制御系ではフィードフォワードトルク $\tau_f$ とフィードバックトルク $\tau_b$ の和をトルク指令 $\tau_r$ として制御対象1を駆動する。

【0052】図1のモデル信号演算部4およびトルク指令演算部5を図3の一般的な2自由度制御系に等価変換すると、フィードフォワード制御器14の伝達特性 $C_f(s)$ およびフィードバック制御器13の伝達特性 $C_b(s)$ は次の式17および式18で表される。

$$C_f(s) = G_a(s) \cdot G_f(s) \quad \dots \dots \text{(式17)}$$

$$C_b(s) = K_v \cdot s + K_x + K_i / s \quad \dots \dots \text{(式18)}$$

ただし、上記の式17において  $G_f(s) = (\alpha_r \cdot J_a \cdot s^3 + \alpha_v \cdot K_v \cdot s^2 + \alpha_x \cdot K_x \cdot s + K_i) / s$   $\dots \dots \text{(式19)}$

である。また、次の式20のようにフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ の全てを1とおいた場合の $G_f(s)$ を $G_f1(s)$ とおく。

$$G_f1(s) = (J_a \cdot s^3 + K_v \cdot s^2 + K_x \cdot s + K_i) / s \quad \dots \dots \text{(式20)}$$

【0053】次に、フィードフォワードトルク $\tau_f$ から実位置 $x_m$ までの伝達関数は外乱トルク $\tau_d$ から実位置 $x_m$ までの応答 $G_r(s)$ と全く同じである。したがって、位置指令 $x_r$ から実位置 $x_m$ までの応答は次の式21で表される。

$$x_m / x_r = C_f(s) \cdot G_r(s)$$

$$= G_a(s) \cdot G_f(s) \cdot G_r(s) \quad \dots \dots \text{(式21)}$$

【0054】ここで、上式において $G_a(s)$ は上述のように、モデル信号演算部4の伝達特性 $G_a(s)$ であり、これをローパス特性とすることにより、モデル信号演算部4および制御対象1の応答の速さを設定する部分である。また、式21で表される位置指令 $x_r$ から実位置 $x_m$ までの応答からモデル伝達特性を除いた伝達特性 $G_f(s) \cdot G_r(s)$ が応答を補正する特性となり、この $G_f(s) \cdot G_r(s)$ の伝達特性は式19より次の式22となる。

$$G_f(s) \cdot G_r(s) = (\alpha_r \cdot J_a \cdot s^2 + \alpha_v \cdot K_v \cdot s + \alpha_x \cdot K_x + K_i / s) \cdot G_r(s) \quad \dots \dots \text{(式22)}$$

【0055】上記の式22より、 $G_f(s) \cdot G_r(s)$ の応答は図2に示した外乱応答 $G_r(s)$ の積分、比例、微分、2階微分の応答の線形和となる。図4に $K_i \cdot G_r(s) / s$ 、 $K_x \cdot G_r(s)$ 、 $K_v \cdot s \cdot G_r(s)$ 、 $J_a \cdot s^2 \cdot G_r(s)$ のステップ応答をそれぞれ示す。また、制御対象1が理想モデルの場合、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を全て1とすると $G_f(s) \cdot G_r(s)$ は $G_f1(s) \cdot G_r1(s)$ となり、上述の説明および式16と式20より、 $G_f(s) \cdot G_r(s)$ の伝達特性は1に一致する。すなわち、この場合には、図4に示した4つの波形を加算すると1となる。したがって、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ は、1を基準に設定するものである。

【0056】ここで、上述のように制御対象1にはモデル誤差が有るため、 $G_f(s) \cdot G_r(s)$ の応答は1に近いながらも微少な誤差を生じる。位置指令 $x_r$ から実位置 $x_m$ までの応答は上記の式21であるため、式11に示したモデルの応答 $G_a(s)$ の応答周波数 $\omega_a$ を小さくすると、モデルの応答自体の高い周波数成分が除去されるため、モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との誤差が小さくなる。したがって、機械共振などの高周波数で生じる誤差については、モデルの応答周波数 $\omega_a$ を所定量小さくすることによって、モデルの応答をそれほど遅くすることなく、モデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との誤差を小さくすることができる。しかしながら、式3に示した粘性摩擦や、それによって生じるオーバーシュートなどの比較的低い周波数で生じる誤差について、モデルの応答周波数 $\omega_a$ を更に小さくして誤差を低減しようとすると、第1の従来技術で説明した通り、モデルの応答周波数 $\omega_a$ をかなり小さくする必要が有るため、結果的に位置指令 $x_r$ に対する実位置 $x_m$ の応答がかなり遅くなってしまう。

【0057】そこで、例えば位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を1から減じた場合、 $G_f(s) \cdot G_r(s)$ の応答波形が、 $\alpha_x$ が1の場合に比べて図4における $K_x \cdot G_r(s)$ の波形に $(1 - \alpha_x)$ を乗じた波形を減じたものに変化する。このように、フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_r$ を1から変更することにより、フィードバックゲイン $K_v$ 、 $K_x$ 、 $K_i$ を変更することなく、すなわち外乱応答は例えば、図2に示すように最適に保ったまま、また位置指令 $x_r$ に対する実位置 $x_m$ の応答をあまり遅くすることなく、位置指令 $x_r$ に対する実位置 $x_m$ の応答を調整することが可能になる。

【0058】また、制御対象1のモデル誤差の特性は様々であり、このような不確かさにきめ細かく対応してなるべく速く整定させるためには、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ およびトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ を独立に調整することにより、フィードバックゲイン $K_v$ 、 $K_x$ 、 $K_i$

$i$ を最適な値に固定したまま、不確かさにきめ細かく対応して、なるべく速く整定させることが可能になる。

【0059】また、図2に示したように、フィードバックゲイン $K_v$ 、 $K_x$ 、 $K_i$ の通常の調整では、外乱応答 $G_{\tau}(s)$ のステップ応答は符号が正の方向のみに応答するため、位置指令 $x_r$ に対する実位置 $x_m$ の応答がオーバーシュートを起こした場合、前述のように $\alpha_x$ を小さくすれば、必ずオーバーシュートを抑制する方向へ作用する。そこで一例として、図5に、制御対象1の特性を理想モデルとしたシミュレーションで、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ およびトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_{\tau}$ は1に固定したまま、 $\alpha_x$ を小さく変化させた場合の $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の応答の変化の様子を示す。図5に示した $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の応答の変化より、実際の実位置 $x_m$ の応答が微少なオーバーシュートを起こした場合は、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ だけを1より少し小さくすることにより、簡単な制御器内の演算と簡単な調整でオーバーシュートを抑制することが可能である。

【0060】また、上記では位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ だけを小さくするましたが、図5に示した位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ だけを1より小さくした場合の $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答は、時刻0の直後に1まで立上り、その後一旦小さくなり再び緩やかに上昇して1に達している。すなわち位置指令 $x_r$ に対するトルク指令 $\tau_r$ には、オーバーシュートの抑制にはあまり関与しない高い周波数成分が大きく含まれている。一方、制御対象1の高周波数領域における特性には機械共振が含まれていることが多いため、オーバーシュート抑制に寄与しないトルク指令 $\tau_r$ の高周波数成分は低減した方が機械共振の抑制効果が大きくなる。したがって、オーバーシュートを抑制するために位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を1より小さくすると同時に、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ やトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_{\tau}$ も1より小さくした方が振動抑制効果が大きくなり整定時間の短縮につながる。

【0061】ここで、例えば速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を小さくしたことによる $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答の変化は、図4の $K_v \cdot s \cdot G_{\tau}(s)$ の波形に定数を掛けたものを減じることになり、またトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_{\tau}$ を小さくしたことによる $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答の変化は、図4の $J_a \cdot s^2 \cdot G_{\tau}(s)$ の波形に定数をかけたものを減じることになるため、応答波形は正負の両方向へ変化し、不用意に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ やトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_{\tau}$ を小さくすると、それが逆にオーバーシュートを増大させる原因となったり、特定の周波数成分が残るため応答が振動的になったりする。したがって、フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_{\tau}$ に、適切な関係式を持たせることにより、簡単な調整でオーバーシュートを抑制し、なおかつ振動抑制効果も得ることが可能になる。

【0062】次に、その一例としてフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_{\tau}$ に次の式23の関係を持たせた場合を説明する。

$$\alpha_x = \alpha_v = \alpha_{\tau} \cdots \text{(式23)}$$

【0063】上記の式23の関係を持たせてフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_{\tau}$ を1から小さくした場合の $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の応答は、式23より次の式24で表される。

$$G_f(s) \cdot G_{\tau}(s) = \alpha_x \cdot G_f(s) \cdot G_{\tau}(s) + K_i \cdot (1 - \alpha_x) \cdot G_{\tau}(s) / s \cdots \text{(式24)}$$

すなわち、 $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の伝達特性は1に近いので、 $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答波形は、高さ $\alpha_x$ のステップ状変化と、図4に示した $K_i \cdot G_{\tau}(s) / s$ の波形を定数倍したものとの和になる。図6に、 $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の伝達特性を1とし、式23の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を小さくした場合の $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答の変化を示す。図の変化の様子より、 $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ が微少なオーバーシュートを起こす場合には、式23の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_{\tau}$ を小さくすると、なめらかに、また一つのパラメータ $\alpha_x$ による簡単な調整で、オーバーシュートを抑制することが可能になる。

【0064】次に、一例としてフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_{\tau}$ に次の式25の関係を持たせた場合を説明する。

$$\alpha_v = \alpha_x^2, \alpha_{\tau} = \alpha_x^3 \cdots \text{(式25)}$$

【0065】上記の式25の関係を持たせてフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_{\tau}$ を1から小さくした場合の $G_f(s)$ は下式で表される。

$$G_f(s) = [J_a \cdot (\alpha_x \cdot s)^3 + K_v \cdot (\alpha_x \cdot s)^2 + K_x \cdot \alpha_x \cdot s + K_i] / s \quad \text{図7に、} G_f(s) \cdot G_{\tau}(s) \text{の伝達特性を1とし、式25の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン} \alpha_x \text{を小さくした場合の} G_f(s) \cdot G_{\tau}(s) \text{のステップ応答の変化を示す。図の変化の様子より、} G_f(s) \cdot G_{\tau}(s) \text{が微少なオーバーシュートを起こす場}$$

合には、式25の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_t$ を小さくすると、立ち上がりを小さく、すなわち高周波数成分をより小さくしながら、なめらかに、また一つのパラメータ $\alpha_x$ による簡単な調整でオーバーシュートを抑制することが可能になる。

【0066】実施の形態1は以上のように構成することにより、フィードフォワードゲイン設定要素である位置フィードフォワード増幅器12を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と独立にかつ速度比例ゲイン $K_v$ 、位置比例ゲイン $K_x$ 、位置積分ゲイン $K_i$ と独立に1以外の値に設定できるため、またトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ や速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ が1のままで位置フィードフォワード増幅器12における位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を1を基準にして小さく微調整することにより、簡単な制御器の演算で、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0067】また、実施の形態1はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器10と速度フィードフォワード増幅器11と位置フィードフォワード増幅器12を備え、フィードフォワードゲイン $\alpha_t$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を互いに独立に、かつフィードバックゲイン $K_v$ 、 $K_x$ 、 $K_i$ と独立に1以外の値に設定できるため、フィードフォワードゲイン $\alpha_t$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を1を基準にきめ細かく微調整することにより、外乱応答を最適に保ったまま、高速に整定させることが可能である。

【0068】さらに、実施の形態1はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器10と速度フィードフォワード増幅器11と位置フィードフォワード増幅器12を備え、フィードフォワードゲイン $\alpha_t$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ をフィードバックゲイン $K_v$ 、 $K_x$ 、 $K_i$ と独立で適切な関係式を用いて一つのパラメータで設定することによって、フィードフォワードゲイン $\alpha_t$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を1を基準に一つのパラメータ $\alpha_x$ で微調整することにより、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して滑らかかつ高速に整定させることが可能である。

【0069】さらに、実施の形態1はモデル信号演算部4における位置指令 $x_r$ からモデル位置 $x_a$ までの応答がローパス特性となるように構成し、フィードフォワード設定要素である位置フィードフォワード増幅器12を備え位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を1以外の値に設定できるため、モデル伝達特性 $G_a(s)$ をローパス特性として機械共振の励起を抑制し、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を1を基準にして小さく微調整することにより、外乱応答を最適に保ったまま、振動を抑制し、オーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0070】なお、以上の実施の形態1の説明では、トルク指令演算部5においてトルクフィードフォワード増幅器を備えるとして構成したが、モデル信号演算部4における式14の伝達関数演算で、モデルイナーシャ $J_a$ を制御対象1のイナーシャ $J$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗じた値にするように構成しても、全く同じ効果を持つことは言うまでもない。

【0071】また、例えば速度比例補償器8の出力などの信号に、ローパスフィルタを挿入したような場合も、本発明の本質的効果に変わりなく、同様の効果を持つことは言うまでもない。更に、高周波の機械共振の抑制は、その条件によっては、モデル信号演算部4の伝達関数をローパス特性とすることによるのではなく、上述した各フィードフォワードゲインの設定を調整することにより行うこともできることは言うまでもない。

【0072】実施の形態2、図8は実施の形態2の位置制御装置の構成を示すブロック図である。図8において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0073】105はトルク指令演算部である。106は位置積分器である。107は速度比例補償器、108は位置比例補償器、109は位置積分補償器である。110はトルクフィードフォワード増幅器、111は速度フィードフォワード増幅器、112は位置フィードフォワード低減器である。

【0074】図1に示した実施の形態1ではモデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を乗じたフィードフォワード位置 $x_f$ と実位置との差信号を用いてトルク指令 $\tau_r$ を演算していたが、位置指令 $x_r$ の移動距離が大きい場合には、定常的に位置比例補償器8の出力が大きくなり、またこの出力を相殺するように位置積分補償器9の出力信号が大きな値を持つため、計算条件が悪くなる可能性があるが、この実施の形態2は以上の不具合を解消したものである。

【0075】次に実施の形態2の動作について説明する。実施の形態1と異なる部分であるトルク指令演算部105の動作について説明する。トルク指令演算部105はモデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデル位置 $x_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力する。トルク指令演算部105の内部においてトルクフィードフォワード増幅器110はモデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗じたフィードフォワード

トルク $\tau_f$ を出力し、速度フィードフォワード増幅器111はモデル速度 $va$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗じたフィードフォワード速度 $vf$ を出力し、位置フィードフォワード低減器112はモデル速度 $va$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\beta_x$ を乗じたフィードフォワード位置(位置フィードフォワード低減信号) $xf$ を出力する。

【0076】次に位置積分器106はモデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差から上記の位置フィードフォワード低減信号 $xf$ を減じた信号を積分した信号を出力し、速度比例補償器107はフィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に速度比例ゲイン $K_v$ を乗じた信号を出力し、位置比例補償器108はモデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置比例ゲイン $K_x$ を乗じた信号を出力し、位置積分補償器109は位置積分器106の出力信号に位置積分ゲイン $K_i$ を乗じた信号を出力し、トルク指令演算部105はフィードフォワードトルク $\tau_f$ と速度比例補償器107の出力と位置比例補償器108の出力と位置積分補償器109との出力の和信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力することにより制御対象1を制御する。

【0077】以上のように構成することにより、トルク指令演算部105はモデル位置 $xa$ 、モデル速度 $va$ 、モデルトルク $\tau_a$ 、実位置 $xm$ 、実速度 $vm$ に基づき次の式26の伝達関数演算によりトルク指令 $\tau_r$ を出力する。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + K_v(\alpha_v \cdot va - vm) + K_x(xa - xm) + K_i(1/s)(xa - xm - \beta_x \cdot va) \quad \dots \dots \text{(式26)}$$

【0078】ここで、モデル速度 $va$ の積分はモデル位置 $xa$ であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるように式26を変換すると、次の式27となる。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + K_v(\alpha_v \cdot va - vm) + K_x\{(1 - K_i \cdot \beta_x / K_x)xa - xm\} + K_i(1/s)(xa - xm) \quad \dots \dots \text{(式27)}$$

【0079】したがって、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を下式の式28で定義すると、上記の式26の演算は実施の形態1のトルク指令演算部5における式15の演算と全く同じになる。

$$\alpha_x = 1 - K_i \cdot \beta_x / K_x \quad \dots \dots \text{(式28)}$$

【0080】

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + K_v(\alpha_v \cdot va - vm) + K_x(\alpha_x \cdot xa - xm) + K_i(1/s)(xa - xm) \quad \dots \dots \text{(式15)}$$

【0081】また位置フィードフォワード低減ゲイン $\beta_x$ を設定することにより、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ およびフィードバックゲイン $K_v$ 、 $K_x$ 、 $K_i$ と独立に設定することができる。

【0082】上記のように構成することにより、実施の形態2は実施の形態1と全く同様の効果を持ち、しかも、位置指令 $x_r$ が大きくなても位置比例補償器108の出力が特に大きくなるということがなく、安定した動作特性が得られる。

【0083】実施の形態3、図9は実施の形態3の制御系を示すブロック図である。図9において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0084】205はトルク指令演算部である。206は位置補償器、207は速度PI補償器である。210はトルクフィードフォワード増幅器、211は速度フィードフォワード増幅器である。

【0085】次に実施の形態3の動作について説明する。実施の形態1と異なる部分であるトルク指令演算部205の動作について説明する。トルク指令演算部205はモデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $va$ とモデル位置 $xa$ と実速度 $vm$ と実位置 $xm$ とを入力する。トルク指令演算部205の内部においてトルクフィードフォワード増幅器210はモデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ を乗じたフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力し、速度フィードフォワード増幅器211はモデル速度 $va$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗じたフィードフォワード速度 $vf$ を出力する。

【0086】次に位置補償器206はモデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置ゲイン $\omega_x$ を乗じた信号を出力し、速度PI補償器207はフィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との差信号に位置補償器106の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン $K_v$ と積分ゲイン $\omega_{PI}$ のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク $\tau_c$ を出力する。また、トルク指令演算部205はフィードフォワードトルク $\tau_f$ と誤差補償トルク $\tau_c$ との和信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力する。すなわちトルク指令演算部205は以下の式29の演算によりトルク指令 $\tau_r$ を演算する。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + K_v(1 + \omega_{PI}/s) \{ \alpha_v \cdot va - vm + \omega_x(xa - xm) \} \quad \dots \dots \text{(式29)}$$

【0087】ここで、モデル速度 $va$ の積分はモデル位置 $xa$ であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるように式29を変換すると、次の式30、式31、式32、式33となる。

$$\tau_r = \alpha\tau \cdot \tau_a + K_v(v_r - v_m) + K_x(x_r - x_m) + K_i(1/s)(x_r - x_m) \quad \dots \dots \text{(式30)}$$

$$\text{ただし、 } K_x = K_v(\omega_x + \omega_{PI}) \quad \dots \dots \text{(式31)}$$

$$K_i = K_v \cdot \omega_x \cdot \omega_{PI} \quad \dots \dots \text{(式32)}$$

$$\alpha x = (\omega_x + \alpha v \cdot \omega_{PI}) / (\omega_x + \omega_{PI}) \quad \dots \dots \text{(式33)}$$

【0088】上記の式31、式32、式33より、式30における位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ は、速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ と独立かつ位置比例ゲイン $K_x$ および位置積分ゲイン $K_i$ と独立に設定することはできない。しかしながら、速度フィードフォワード増幅器211における速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ を1より小さくすることにより式15における位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ も1より小さくなる。また、位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ との関係は式33により、フィードバックゲインである位置ゲイン $\omega_x$ と積分ゲイン $\omega_{PI}$ との関係で決まるため、フィードバック特性は多少変化するがこの位置ゲイン $\omega_x$ と積分ゲイン $\omega_{PI}$ との大小関係を調整することにより、速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ を小さくすることによって位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ が急速に小さくなり、速度フィードフォワードゲイン $\alpha v$ を調整することでオーバーシュートの抑制が確実にできる。

【0089】また、高周波数の機械共振に対しては、実施の形態1と同様に、モデル信号演算部4におけるモデル伝達特性 $G_a(s)$ の応答周波数 $\omega_a$ を小さくすることにより、機械振動抑制効果が大きく得られる。

【0090】以上のように構成することにより、実施の形態3は位置指令 $x_r$ からモデル位置 $x_a$ までの伝達特性がローパス特性をもつモデル信号演算部4を備え、フィードフォワードゲイン設定要素である速度フィードフォワード増幅器211によって位置フィードフォワードゲイン $\alpha x$ を小さくすることにより、外乱抑制効果は多少犠牲にするが、比較的簡単な演算で振動を抑制し、オーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0091】実施の形態4、図10は実施の形態4の制御系を示すブロック図である。図10において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0092】304は外部から位置指令 $x_r$ を入力しモデル位置 $x_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部である。313は第1の微分器である。314は第2の微分器である。315はイナーシャ増幅器である。305はトルク指令演算部である。306は位置補償器、307は速度PI補償器である。310はトルクフィードフォワード増幅器、311は速度フィードフォワード低減器、312は位置フィードフォワード低減器である。

【0093】次に実施の形態4の動作を説明する。モデル信号演算部304は位置指令 $x_r$ を入力し、第1の微分器313は位置指令 $x_r$ を微分して速度指令 $v_r$ を出力し、第2の微分器314は速度指令 $v_r$ を微分して加速度指令 $a_r$ を出力し、イナーシャ増幅器315は加速度指令 $a_r$ に予め設定した制御対象1のイナーシャの推定値 $J_a$ を乗じたモデルトルク $\tau_a$ を出力する。

【0094】以上の動作によりモデル信号演算部304では以下の式34、式35、式36の伝達関数演算を行っている。

$$x_a = x_r \quad \dots \dots \text{(式34)}$$

$$v_a = s \cdot x_r \quad \dots \dots \text{(式35)}$$

$$\tau_a = J_a \cdot s^2 \cdot x_r \quad \dots \dots \text{(式36)}$$

【0095】上記の式34、式35、式36より、実施の形態4におけるモデル信号演算部304は、実施の形態1におけるモデル信号演算部4において、モデル伝達特性 $G_a(s)$ を1としたものに他ならない。したがってモデル伝達特性 $G_a(s)$ はローパス特性を持たないが、それ以外の点では実施の形態1と同様の特性を持つ。

【0096】次にトルク指令演算部305の動作について説明する。トルク指令演算部305はモデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデル位置 $x_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力する。トルク指令演算部305の内部においてトルクフィードフォワード増幅器310はモデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ を乗じたフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力し、速度フィードフォワード低減器311はモデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_v$ を乗じたフィードフォワード速度(速度フィードフォワード低減信号) $v_f$ を出力し、位置フィードフォワード低減器312はモデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_x$ を乗じたフィードフォワード位置(位置フィードフォワード低減信号) $x_f$ を出力する。

【0097】次に位置補償器306はモデル位置 $x_a$ と実位置 $x_m$ との偏差に位置ゲイン $\omega_x$ を乗じた信号を

出力し、速度PI補償器307はモデル速度vaと実速度vmとの偏差に位置補償器306の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲインKvと積分ゲイン $\omega PI$ のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク $\tau_c$ を出力する。また、トルク指令演算部305はフィードフォワードトルク $\tau_f$ から速度フィードフォワード低減信号vfと位置フィードフォワード低減信号xfとを減算した信号に誤差補償トルク $\tau_c$ を加算した信号をトルク指令 $\tau_r$ として出力する。すなわちトルク指令演算部305は以下の式37の演算によりトルク指令 $\tau_r$ を演算する。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a - \gamma_v \cdot va - \gamma_x \cdot xa + Kv \cdot (1 + \omega PI / s) \{ va - vm + \omega x (xa - xm) \} \quad \dots \dots \text{(式37)}$$

【0098】ここで、モデル速度vaの積分はモデル位置xa、実速度vmの積分は実位置xmであるため、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるように式37を変換すると、次の式38、式39、式40、式41となる。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + Kv (\alpha_v \cdot va - vm) + Kx (\alpha_x \cdot xa - xm) + Ki (1 / s) (xa - xm) \quad \dots \dots \text{(式38)}$$

$$\text{ただし、} Kx = Kv (\omega x + \omega PI) \quad \dots \dots \text{(式39)}$$

$$Ki = Kv \cdot \omega x \cdot \omega PI \quad \dots \dots \text{(式40)}$$

$$\alpha_v = 1 - \gamma_v / Kv \quad \dots \dots \text{(式41)}$$

$$\alpha_x = 1 - \gamma_x / Kx \quad \dots \dots \text{(式42)}$$

【0099】したがって、速度フィードフォワード低減器311で速度フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_v$ を設定することにより速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を独立に設定でき、位置フィードフォワード低減器312で位置フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_x$ を設定することにより位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を独立に設定できる。

【0100】実施の形態4は以上のように構成することにより、フィードバック制御系を位置補償器と速度PI補償器とで構成する場合にも、フィードフォワードゲイン設定要素である位置フィードフォワード低減器312を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と独立にかつフィードバックゲインと独立に1以外の値に設定できるため、またトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ や速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ が1のままでも位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を1を基準にして小さく微調整することにより、簡単な制御器の演算で、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0101】また、実施の形態4はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器310と速度フィードフォワード低減器311と位置フィードフォワード低減器312を備え、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を互いに独立に、かつフィードバックゲインと独立に1以外の値に設定できるため、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を1を基準にきめ細かく微調整することにより、外乱応答を最適に保ったまま、高速に整定させることが可能である。

【0102】実施の形態5、図11は実施の形態5の制御系構成を示すブロック図である。図11において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0103】405はトルク指令演算部である。406は積分器である。407は速度比例補償器、408は位置比例補償器、409は位置積分補償器である。410はトルクフィードフォワード増幅器、411は速度フィードフォワード増幅器である。

【0104】次に実施の形態5の動作について説明する。実施の形態1と異なる部分であるトルク指令演算部405の動作について説明する。トルク指令演算部405はモデルトルク $\tau_a$ とモデル速度vaとモデル位置xaと実速度vmと実位置xmとを入力する。トルク指令演算部405の内部においてトルクフィードフォワード増幅器410はモデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ を乗じたフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力し、速度フィードフォワード増幅器411はモデル速度vaに速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗じたフィードフォワード速度vfを出力する。

【0105】次に位置積分補償器409はモデル位置xaと実位置xmとの偏差に位置積分ゲイン $\omega_i$ を乗じた信号を出力し、積分器406は位置積分補償器409の出力からモデル速度vaとフィードフォワード速度vfとの差信号を減算した信号を入力し積分した信号を出力する。次に位置比例補償器408はモデル位置xaと実位置xmとの差信号に積分器406の出力を加算した信号を入力し、位置ゲイン $\omega_x$ を乗じた信号を出力する。次に速度比例補償器407はフィードフォワード速度vfと実速度vmとの差信号に位置比例補償器408の出力を加算した信号を入力し速度比例ゲインKvを乗じた信号を出力し、トルク指令演算部405は速度比例補償器407の出力とフィードフォワードトルク $\tau_f$ との和信号をトルク

指令 $\tau_r$ として出力する。すなわちトルク指令演算部405は次の式43の演算によりトルク指令 $\tau_r$ を演算する。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + K_v [\alpha_v \cdot v_a - v_m + \omega_x \{ x_a - x_m + (1/s) (\omega_i (x_a - x_m) - (1 - \alpha_v) v_a) \}] \dots \text{ (式43)}$$

【0106】ここで、モデル速度 $v_a$ の積分はモデル位置 $x_a$ であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるように式43を変換すると、次の式44、式45、式46、式47となる。

$$\tau_r = \alpha_r \cdot \tau_a + K_v (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m) \dots \text{ (式44)}$$

ただし、 $K_x = \omega_x \cdot K_v \dots \text{ (式45)}$

$$K_i = \omega_i \cdot \omega_x \cdot K_v \dots \text{ (式46)}$$

$$\alpha_x = \alpha_v \dots \text{ (式47)}$$

【0107】上記の式45、式46、式47より、式15における位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ は、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と同じ値になる。またフィードフォワードゲイン設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器410によりトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ を、また速度フィードフォワード増幅器411の速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を設定することにより、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ および位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を、フィードバックゲインと独立に設定することが可能である。更に、図11におけるトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ を速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と同じ値にするような関係式を持たせると、式44におけるフィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ の間に実施の形態1における式23の関係が成立するため、実施の形態1と同様に一つのパラメータ $\alpha_v$ で滑らかにオーバーシュートを抑制するように調整できる。

【0108】実施の形態5は以上のように構成することにより、フィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器410と速度フィードフォワード増幅器411を備え、比較的簡単な演算で、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ とを良好な関係に保ったまま、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ の全てをフィードバックゲインと独立に1以外の値に設定できるため、オーバーシュートを抑制し、外乱応答を最適に保ったまま、高速に整定させることができる。

【0109】また、実施の形態5はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器410と速度フィードフォワード増幅器411を備え、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ をフィードバックゲインと独立で適切な関係式を用いて一つのパラメータで設定することによって、フィードフォワードゲイン $\alpha_r$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_x$ を1を基準に一つのパラメータ $\alpha_v$ で微調整することにより、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して滑らかかつ高速に整定させることができる。

【0110】なお、この発明は、上記各実施の形態で説明した具体的な回路構成例に限られるものではなく、上記した所定のモデル信号演算部およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲインを速度フィードフォワードゲインと独立に、かつフィードバックゲインと独立に、また、位置、速度、トルクの各フィードフォワードゲインのすべてをフィードバックゲインと独立に設定可能とする種々の回路構成例に適用できることは言うまでもない。

【0111】

【発明の効果】以上のように、この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインを上記速度フィードフォワードゲインと独立に、かつ上記フィードバックゲインと独立に1以外の値に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインを1を基準に小さくするという簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0112】また、この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトル

ク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとのすべてを上記フィードバックゲインと独立に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを1を基準に変更するという簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0113】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを互いに独立に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを独立に1を基準に変更するという簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0114】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、フィードバックゲインと独立な関係式を用いて設定する構成としたので、外乱に対する特性を最適に保ったまま、より簡単な微調整でオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0115】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたので、外乱に対する特性を最適に保ったまま、1つのパラメータによる簡単な微調整で滑らかにオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

(位置フィードフォワードゲイン) = (速度フィードフォワードゲイン) = (トルクフィードフォワードゲイン)

【0116】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたので、外乱に対する特性を最適に保ったまま、1つのパラメータによる簡単な微調整で滑らかにオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

(トルクフィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)3(速度フィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)2【0117】また、この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 $x_r$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $x_m$ 、速度検出信号である実速度 $v_m$ とを入力しトルク指令 $\tau_r$ を出力し、上記実位置 $x_m$ が上記位置指令 $x_r$ に一致するように上記トルク指令 $\tau_r$ に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $x_r$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $x_a$ とこのモデル位置 $x_a$ の微分信号であるモデル速度 $v_a$ とこのモデル速度 $v_a$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク $\tau_a$ とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク $\tau_a$ とモデル速度 $v_a$ とモデル位置 $x_a$ と実速度 $v_m$ と実位置 $x_m$ とを入力し、位置比例ゲイン $K_x$ と速度比例ゲイン $K_v$ と位置積分ゲイン $K_i$ とトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ とを用いた次式で表される演算に基づいて上記トルク指令 $\tau_r$ を出力するトルク指令演算部を備えたので、各フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_\tau$ を適宜微調整することにより、各フィードバックゲイン $K_x$ 、 $K_v$ 、 $K_i$ で決まる外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \cdot (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m)$$

$s$  : ラプラス演算子【0118】また、この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_a$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ を乗算したフィードフォワードトルク $\tau_f$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v_a$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $v_f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、モデル位置 $x_a$ に位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を乗算し

たフィードフォワード位置 $xf$ を出力する位置フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に速度比例ゲイン $Kv$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記フィードフォワード位置 $xf$ と実位置 $xm$ との偏差に位置比例ゲイン $Kx$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $Ki$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、上記フィードフォワードトルク $tf$ および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 $tr$ として出力するので、各フィードフォワード増幅器により、トルク、速度、位置フィードフォワードゲインのそれぞれを直接設定することができ、その設定の調整がより確実になされる。

【0119】また、この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_{al}$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗算したフィードフォワードトルク $tf$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $va$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $vf$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $va$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\beta_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $xf$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差から上記フィードフォワード位置 $xf$ を減算した信号を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に速度比例ゲイン $Kv$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置比例ゲイン $Kx$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $Ki$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ は次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク $tf$ および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 $tr$ として出力するので、位置指令 $xr$ が大きい場合も、安定した制御動作がなされる。

$\alpha_x = 1 - Ki \cdot \beta_x / Kx$ 【0120】また、この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク $\tau_{al}$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗算したフィードフォワードトルク $tf$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $va$ に速度フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $vf$ を出力する速度フィードフォワード低減器、モデル位置 $xa$ に位置フィードフォワード低減ゲイン $\gamma_x$ を乗算したフィードフォワード位置 $xf$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置ゲイン $\omega_x$ を乗算した信号を出力する位置補償器、および上記モデル速度 $va$ と実速度 $vm$ との偏差に上記位置補償器の出力を加算した信号を入力し、速度比例ゲイン $Kv$ と積分ゲイン $\omega PI$ のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク $\tau_c$ を出力する速度PI補償器を備え、速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ および位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ はそれぞれ次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク $tf$ からフィードフォワード速度 $vf$ とフィードフォワード位置 $xf$ とを減算した信号に誤差補償トルク $\tau_c$ を加算した信号をトルク指令 $tr$ として出力するので、フィードバック制御部が速度PI補償器と位置補償器とで構成されている場合においても、フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_t$ を互いに独立に、かつフィードバックゲインと独立に設定することができる。

$$\alpha_v = 1 - \gamma_v / Kv \quad \alpha_x = 1 - \gamma_x / \{Kv(\omega_x + \omega PI)\}$$

【0121】また、この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 $xr$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $xm$ 、速度検出信号である実速度 $vm$ とを入力しトルク指令 $tr$ を出力し、上記実位置 $xm$ が上記位置指令 $xr$ に一致するように上記トルク指令 $tr$ に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $xr$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $xa$ とこのモデル位置 $xa$ の微分信号であるモデル速度 $va$ とこのモデル速度 $va$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク $\tau_{al}$ とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク $\tau_{al}$ にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha_t$ を乗算したフィードフォワードトルク $tf$ を出力するトルクフィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $va$ に速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ を乗算したフィードフォワード速度 $vf$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に位置積分ゲイン $\omega_i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器の出力から上記モデル速度 $va$ とフィードフォワード速度 $vf$ との偏差を減算した信号を積分した信号を出力する積分器、上記モデル位置 $xa$ と実位置 $xm$ との偏差に上記積分器の出力を加算した信号に位置ゲイン $\omega_x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記フィードフォワード速度 $vf$ と実速度 $vm$ との偏差に上記位置比例補償器の出力を加算した信号に速度比例ゲイン $Kv$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器を設け、上記フィードフォワードトルク $tf$ と速度比例補償器の出力信

号との加算値をトルク指令 $\tau_r$ として出力するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ を下式で設定するので、比較的簡単な演算で、位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ とを良好な関係に保ったまま、フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ 、 $\alpha_v$ 、 $\alpha_\tau$ のすべてをフィードバックゲインと独立に設定することができる。 $\alpha_x = \alpha_v$ 【0122】また、この発明に係る位置制御装置のモデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成したので、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha_\tau$ と速度フィードフォワードゲイン $\alpha_v$ と位置フィードフォワードゲイン $\alpha_x$ とを1を基準に最適に調整することにより、外乱に対する特性を最適に保ったまま、機械共振の励起を抑制しながら、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0123】また、この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成し、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、かつ、少なくとも上記位置フィードフォワードゲインは1以外の値に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインを1を基準に小さくするという簡単な微調整で、外乱に対する特性を最適に保ったまま、機械共振の励起を抑制しながらオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

## 図の説明

### 【図面の簡単な説明】

- 【図1】本発明の実施の形態1の位置制御装置の構成図である。
- 【図2】通常の制御系の外乱に対する応答波形を示す図である。
- 【図3】一般的な二自由度制御系も構成図である。
- 【図4】本発明の信号の応答特性を示す図である。
- 【図5】本発明の実施の形態1における応答変化の一例を示す図である。
- 【図6】本発明の実施の形態1における応答変化の一例を示す図である。
- 【図7】本発明の実施の形態1における応答変化の一例を示す図である。
- 【図8】本発明の実施の形態2の位置制御装置の構成図である。
- 【図9】本発明の実施の形態3の位置制御装置の構成図である。
- 【図10】本発明の実施の形態4の位置制御装置の構成図である。
- 【図11】本発明の実施の形態5の位置制御装置の構成図である。
- 【図12】第1の従来技術の位置制御装置の構成図である。
- 【図13】第2の従来技術の位置制御装置の構成図である。

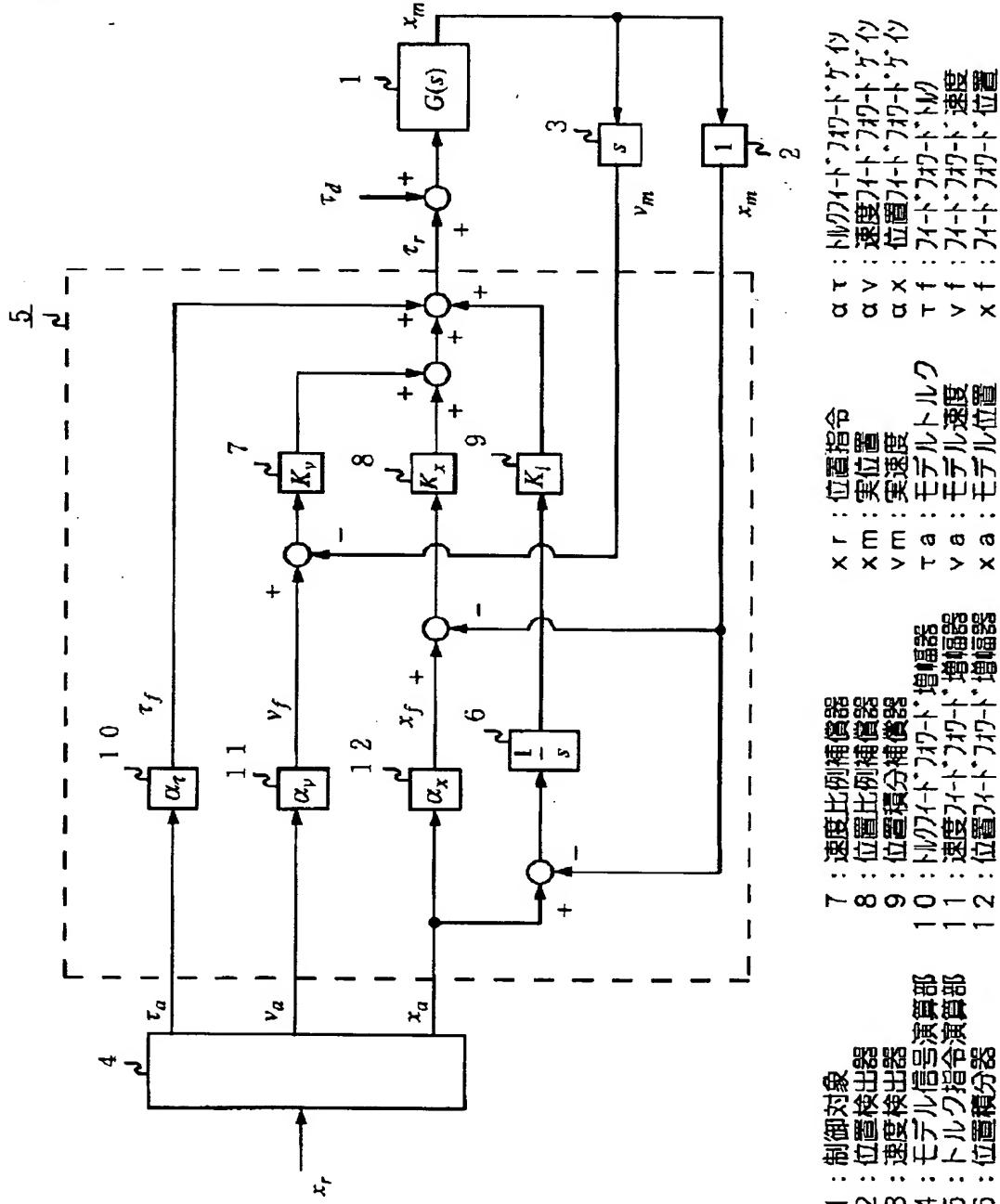
### 【符号の説明】

- 1 制御対象、2 位置検出器、3 速度検出器、4, 304 モデル信号演算部、5, 105, 205, 305, 405 トルク指令演算部、6, 106 位置積分器、7, 107 速度比例補償器、8, 108 位置比例補償器、9, 109 位置積分補償器、10, 110, 210, 310, 410 トルクフィードフォワード増幅器、11, 111, 211, 411 速度フィードフォワード増幅器、12 位置フィードフォワード増幅器、112 位置フィードフォワード低減器、206, 306 位置補償器、207, 307 速度PI補償器、311 速度フィードフォワード低減器、312 位置フィードフォワード低減器、406 積分器、407 速度比例補償器、408 位置比例補償器、409 位置積分補償器、 $x_r$  位置指令、 $x_m$  実位置、 $v_m$  実速度、 $\tau_a$  モデルトルク、 $v_a$  モデル速度、 $x_a$  モデル位置、 $\alpha_\tau$  トルクフィードフォワードゲイン、 $\alpha_v$  速度フィードフォワードゲイン、 $\alpha_x$  位

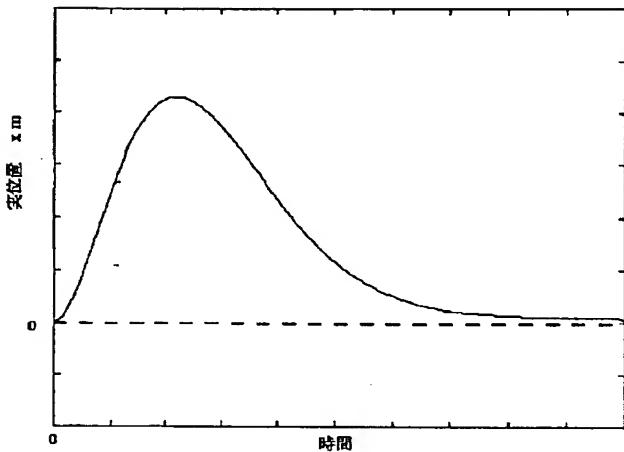
置フィードフォワードゲイン、 $\tau_f$  フィードフォワードトルク、 $v_f$  フィードフォワード速度、 $x_f$  フィードフォワード位置、 $\beta_x$  位置フィードフォワード低減ゲイン、 $\gamma_v$  速度フィードフォワード低減ゲイン、 $\gamma_x$  位置フィードフォワード低減ゲイン。

四面

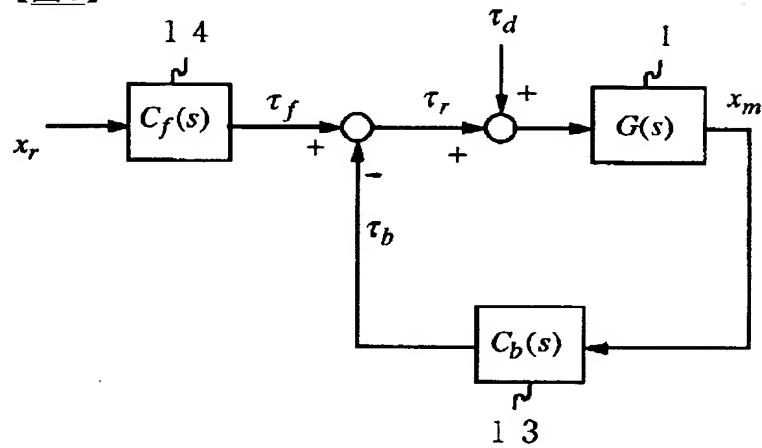
## 【図1】



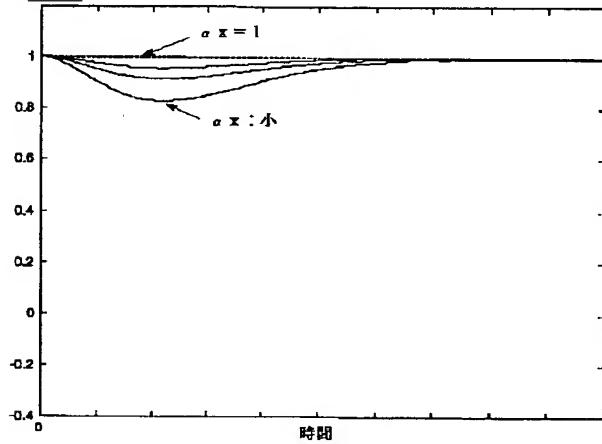
【図2】



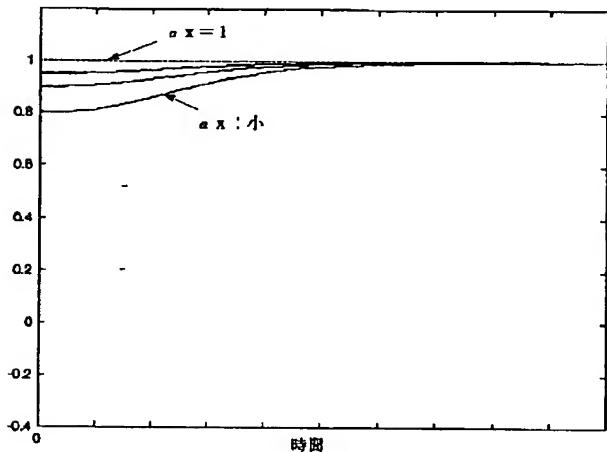
【図3】



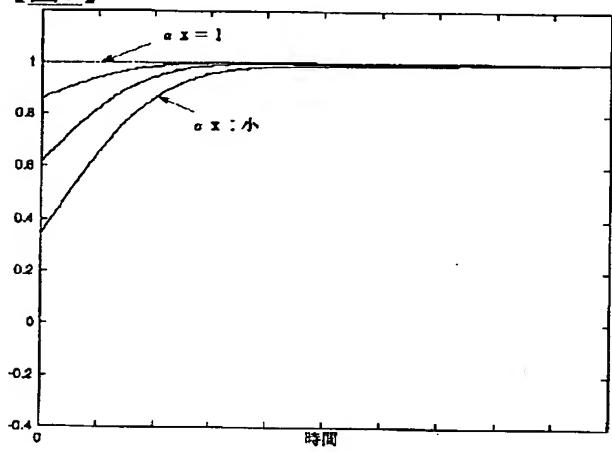
【図5】



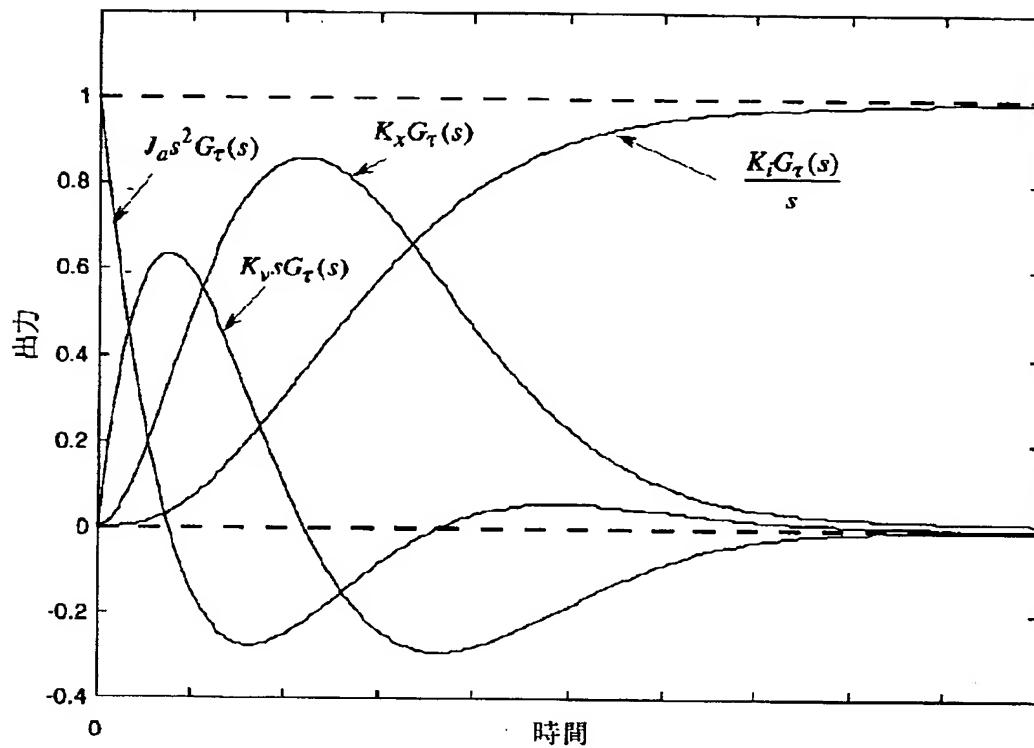
【図6】



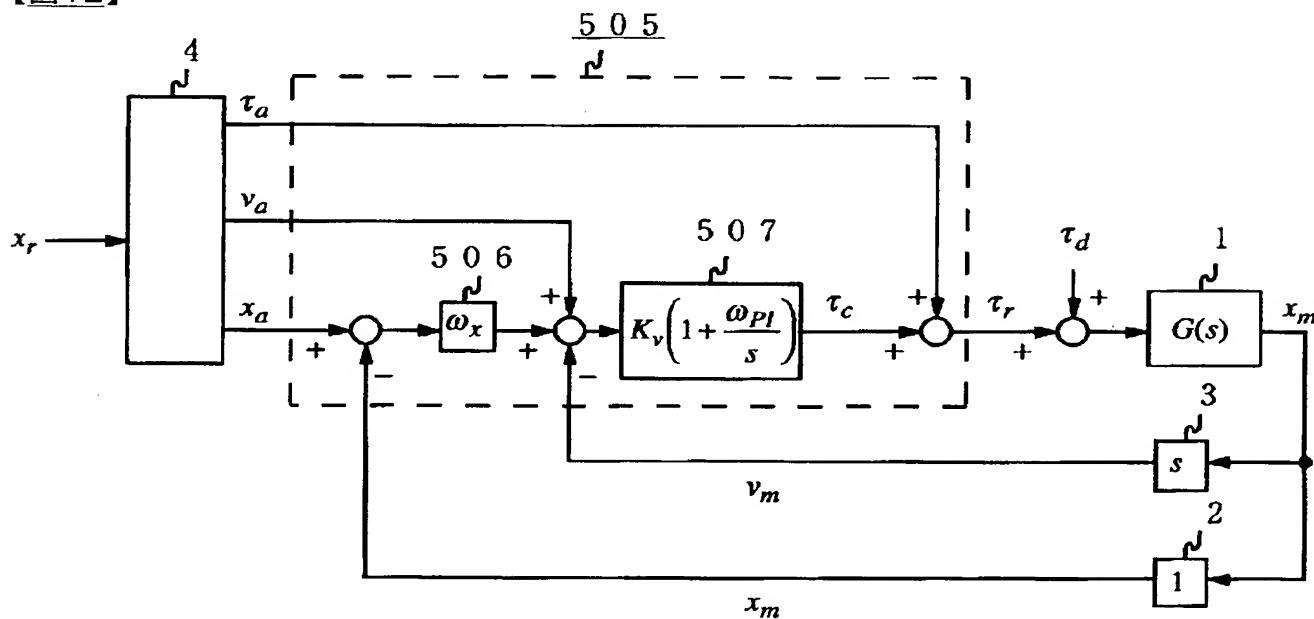
【図7】



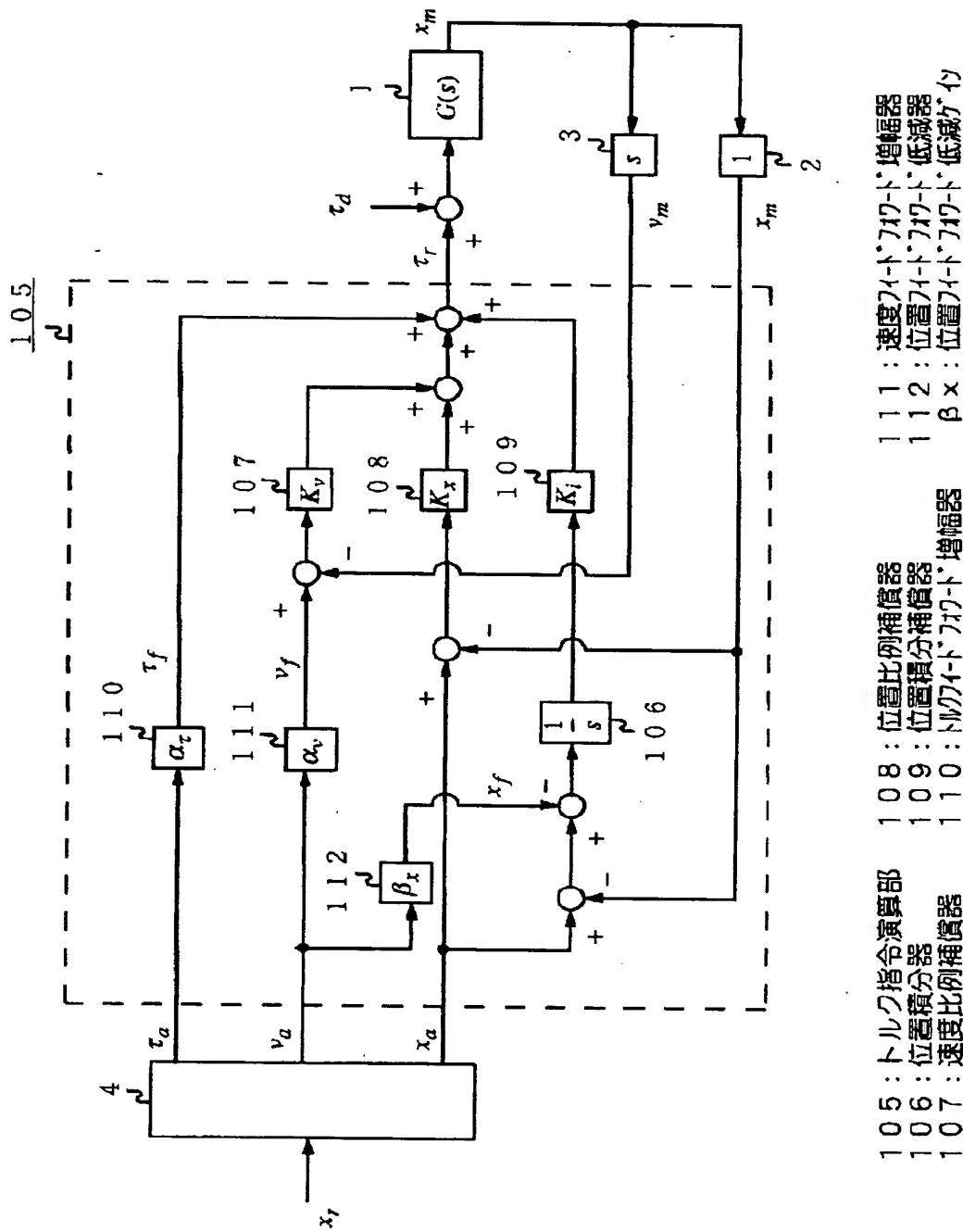
【図4】



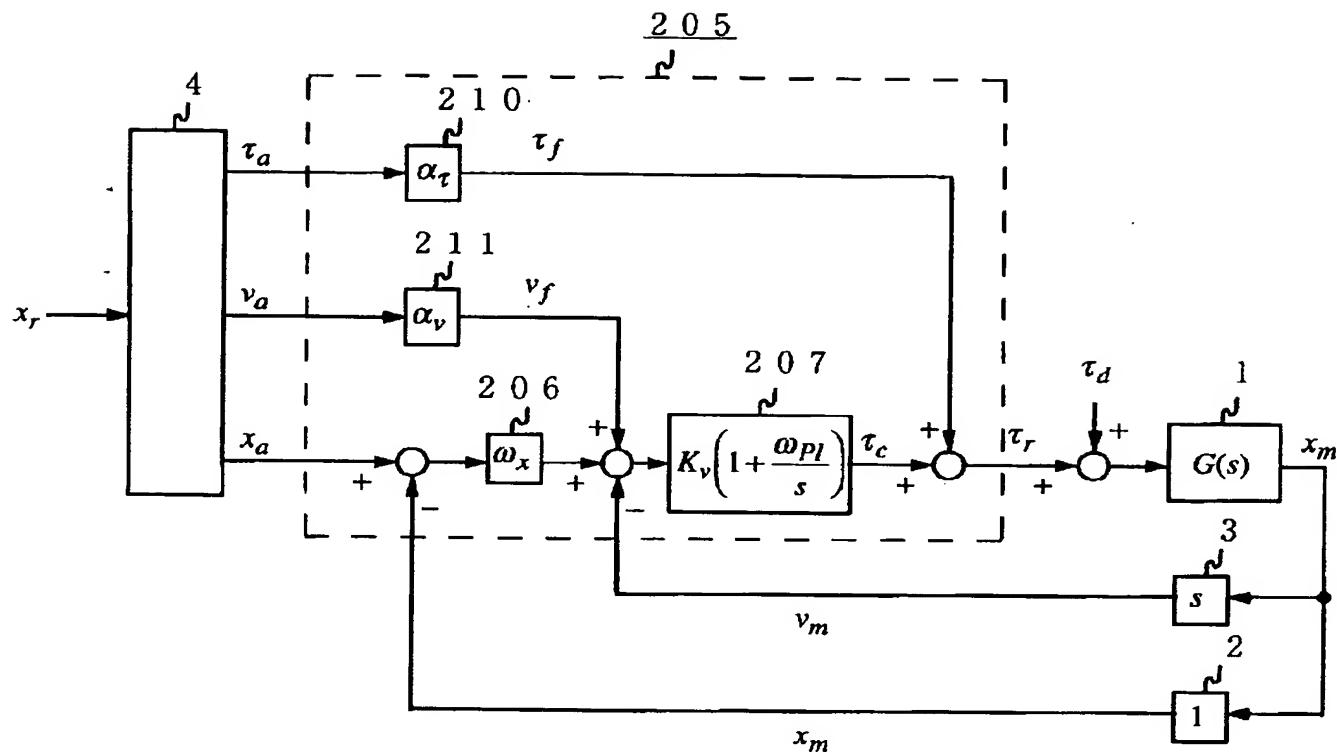
【図12】



【図8】



【図9】



205 : トルク指令演算部

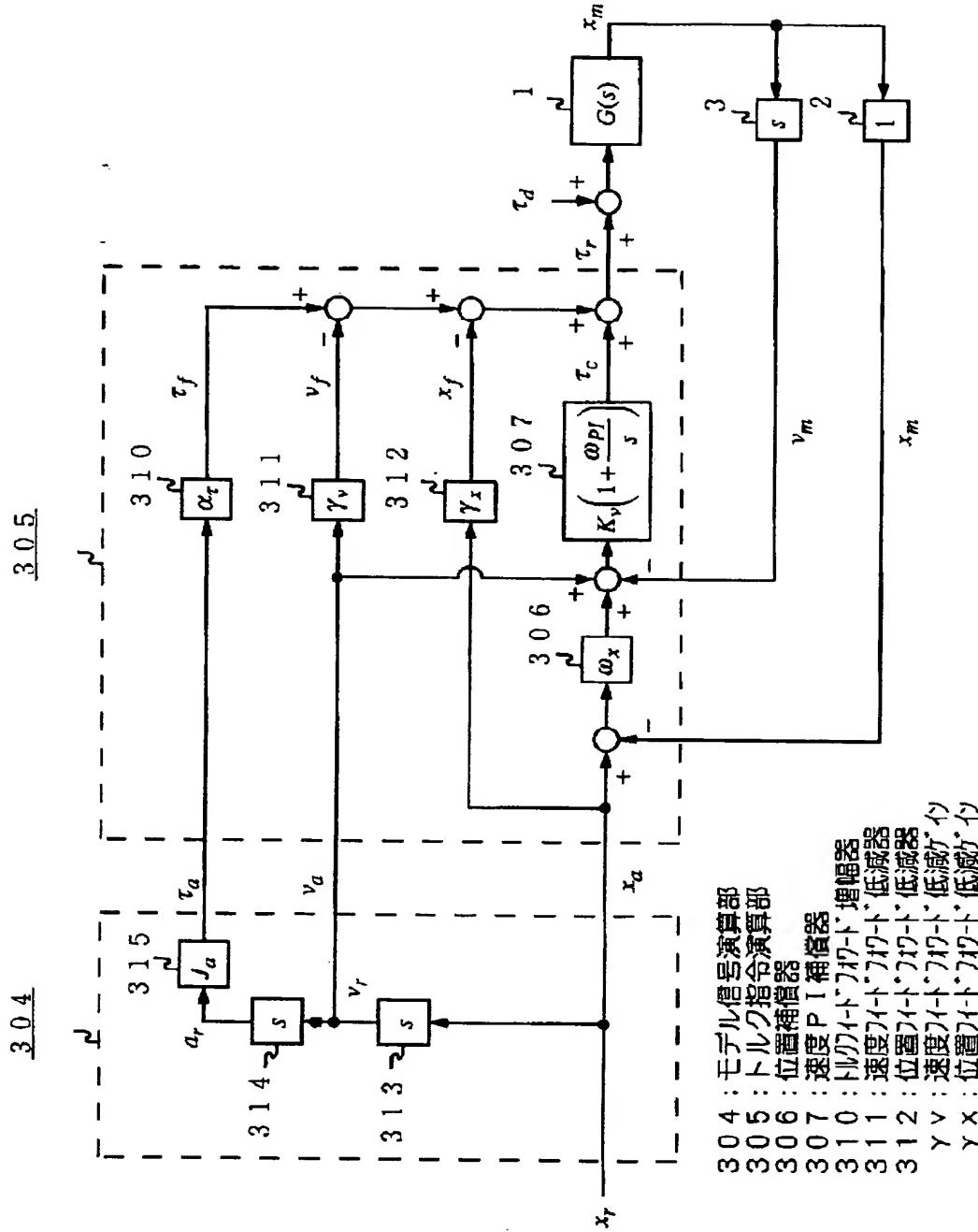
206 : 位置補償器

207 : 速度P I 補償器

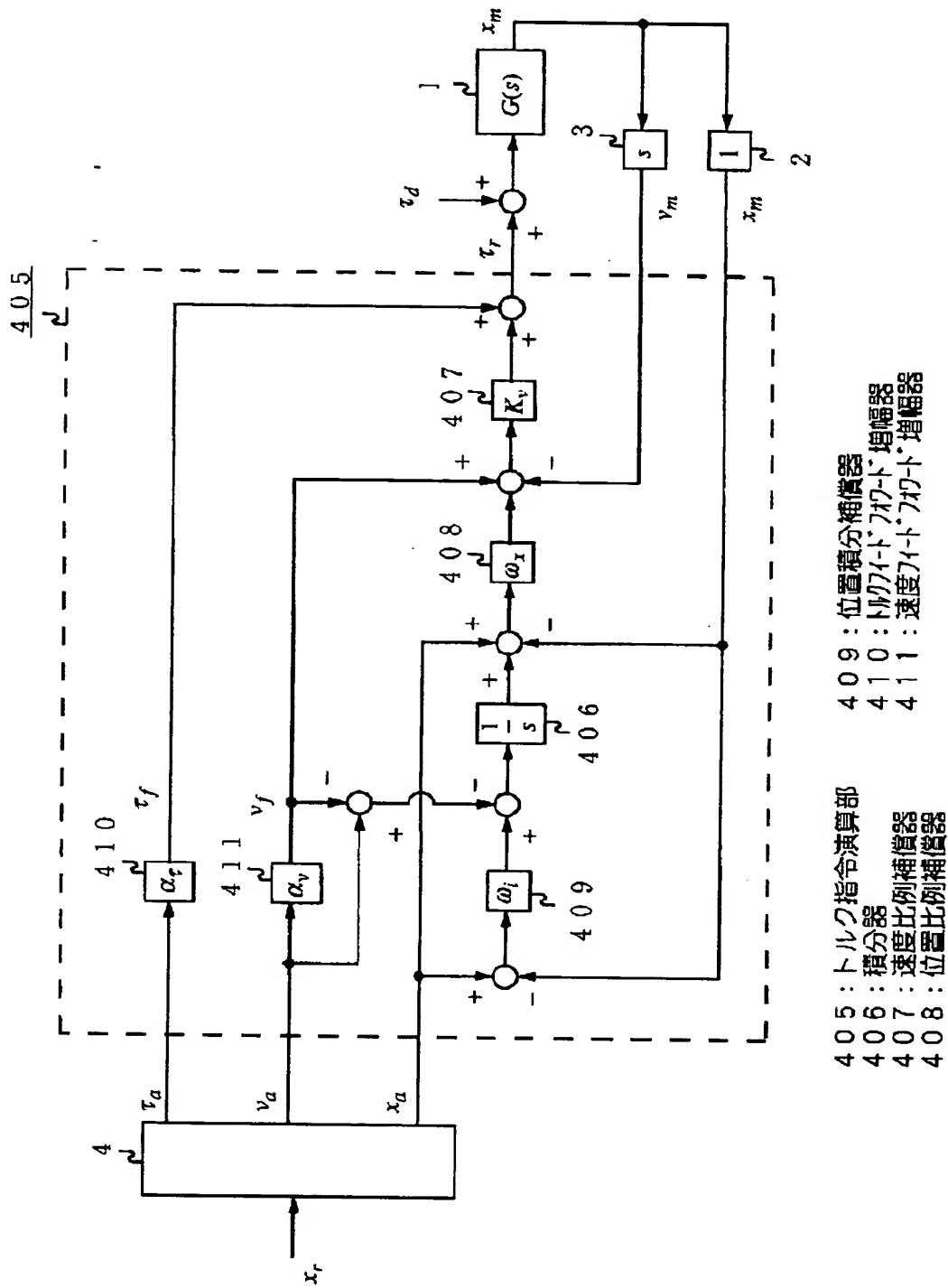
210 : トルクフィードフォワード増幅器

211 : 速度フィードフォワード増幅器

【図10】



【図11】

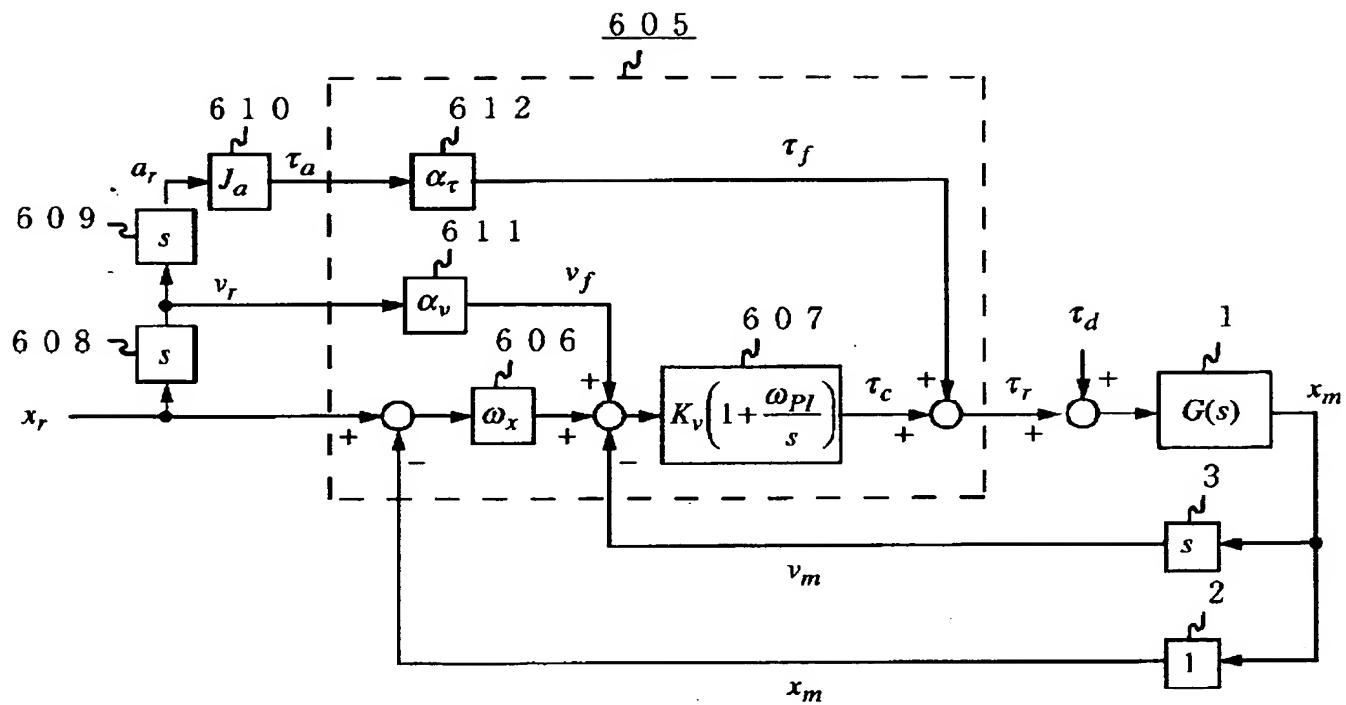


405: トルク指令演算部  
 406: 構分器  
 407: 速度比例補償器  
 408: 位置比例補償器  
 409: 位置積分補償器  
 410: 加速度比例増幅器  
 411: 速度比例増幅器

【図13】

[MENU](#) | [SEARCH](#) | [INDEX](#) | [DETAIL](#) | [JAPANESE](#)

1 / 1



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**